Р. А. КОССОВИЧ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Р. А. КОССОВИЧ

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
# ДЛЯ
# ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ




ЛЕНИНГРАДСКАЯ ВОЕННАЯ ИНЖЕНЕРНАЯ КРАСНОЗНАМЕННАЯ
АКАДЕМИЯ имени А. Ф. МОЖАЙСКОГО

Ленинград—1963

## Замеченные опечатки

| Стр. | Строка | Напечатано | Должно быть | По чьей вине |
|---|---|---|---|---|
| 39 | Рис. 35 | $L_{cm}$ | $L_{яр}$ | Автора |
| 45 | 7-я сверху | $F_{ря} = i \frac{N}{\pi D_я} \tau = AS\tau$ | $F_{ря} = i_я \frac{N}{\pi D_я} \tau = AS\tau$ | Корректора |
| 46 | 11-я снизу | сдиге | сдвиге | » |
| 117 | 4—5-я сверху | скорости | скоростях | » |
| 164 | 3-я сверху | $M_c c = \frac{P_2}{n_2}$ | $M_2 = c \frac{P_2}{n_2}$ | » |

Р. А. Коссович

*Ответственный редактор*
*А. Е. КАПЛЯНСКИЙ*

Технический редактор Е. Г. Элькин

Корректор Л. Н. Ладынина

Подписано к печати 24.6.63 Печ. листов 17,75 Уч.-изд. листов 19

Зак. 756 Для внутриведомственной продажи цена 1 р. 29 коп. Г-314254

Типолитография ЛВИКА им. А. Ф. Можайского

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий учебник написан в соответствии с программой по курсу «Электрические машины летательных аппаратов» для слушателей инженерных факультетов академий и высших военных училищ, но он может быть использован и в качестве учебного пособия слушателями других факультетов высших военных учебных заведений и курсантами технических училищ, изучающих электрические машины летательных аппаратов, а также может быть полезен для инженерно-технического состава строевых частей, эксплуатирующих электрооборудование самолетов и ракет.

В учебнике основное внимание уделено изложению основных вопросов теории, устройства и эксплуатационных свойств бортовых электрических машин постоянного и переменного тока, применяемых на летательных аппаратах. Наряду с этим даны необходимые сведения об особенностях конструктивного исполнения и рабочих характеристиках обычных промышленных электрических машин, которые также применяются в авиации и в ракетной технике в различных наземных установках.

Автор выражает искреннюю признательность профессору, доктору технических наук А. Е. Каплянскому и доценту, кандидату технических наук П. И. Сазанову за ценные советы и критические замечания, сделанные ими при рецензировании рукописи.

*Автор*

# Раздел первый
# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

*ГЛАВА I*

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

### § 1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрическими машинами называются машины, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую или электрической энергии в механическую. В первом случае электрическая машина является генератором, во втором случае — двигателем.

В основу работы генератора и двигателя положены законы электромагнитной индукции и электромагнитной силы, только в первом случае используется электродвижущая сила (сокращенно э. д. с.) и преодолевается электромагнитная сила, во втором — наоборот.

Закон электромагнитной индукции Фарадея устанавливает величину э. д. с., индуктируемой в проводнике при движении его в магнитном поле под действием внешней механической силы. Если проводник перемещается перпендикулярно магнитным линиям поля, то в системе МКСА э. д. с.

$$e = Blv,$$

где $e$ — мгновенное значение э. д. с., *в*;
$B$ — магнитная индукция, *вб/м*$^2$;
$l$ — активная длина проводника, *м*;
$v$ — скорость движения проводника, *м/сек*.

Если воспользоваться системой СГС$\mu_0$ и выразить $B$ в *гс*, $l$ в *см* и $v$ в *см/сек*, то для получения э. д. с. в вольтах в правую часть формулы необходимо ввести коэффициент $10^{-8}$.

Для определения направления э. д. с., индуктируемой в проводнике, обычно используют правило правой руки. Согласно этому правилу, правую руку необходимо расположить в магнитном

поле так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, отогнутый большой палец указывал направление движения проводника, тогда вытянутые четыре пальца покажут направление индуктируемой э. д. с. (рис. 1). Следует заметить, что если проводник остается неподвижным, а перемещается магнитное поле, то большой палец правой руки нужно совместить с направлением, противоположным движению магнитного поля.

На чертежах принято условно изображать э. д. с., направленную за плоскость чертежа, т. е. «от нас», знаком (+), а из-за плоскости чертежа, т. е. «на нас», — знаком (·).

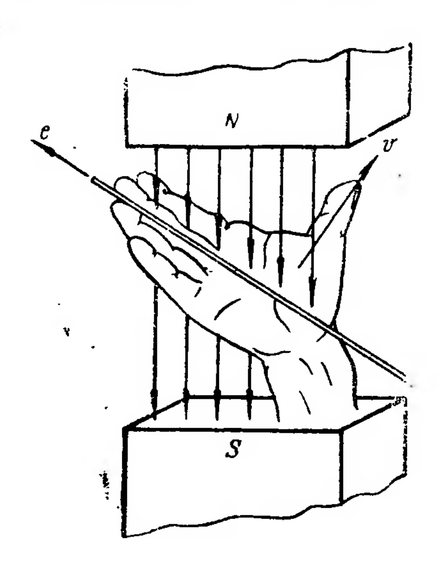



Рис. 1. Правило правой руки

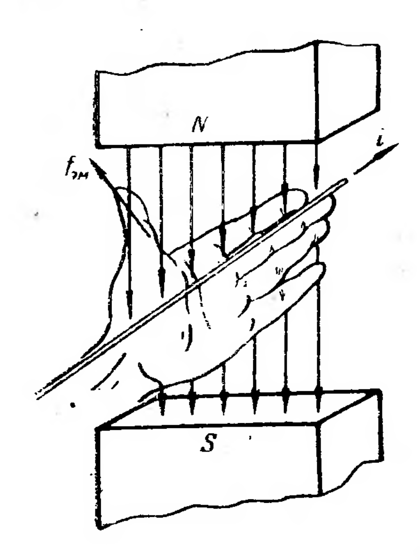



Рис. 2. Правило левой руки

Если проводник, в котором наводится э. д. с., замкнуть на некоторое сопротивление, то в цепи возникнет ток, который будет совпадать по направлению с индуктируемой э. д. с. Этот ток, взаимодействуя с магнитным полем, создаст электромагнитную силу, которая будет противодействовать перемещению проводника.

Если проводник длиною $l$, по которому проходит ток $i$, поместить в магнитном поле с индукцией $B$, то согласно закону Био-Савара на него будет действовать электромагнитная сила, равная

$$f_{эм} = Bil.$$

В системе МКСА электромагнитная сила получается в ньютонах (*н*). Если используется система СГС$\mu_0$, то для определения этой силы в *кГ* в правую часть равенства необходимо ввести коэффициент $10{,}2 \cdot 10^{-8}$.

Направление действия электромагнитной силы определяется по правилу левой руки, которое формулируется следующим

образом: если левую руку расположить в магнитном поле так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, вытянутые четыре пальца показывали направление тока в проводнике, то отогнутый большой палец укажет направление действия электромагнитной силы (рис. 2).

При перемещении проводника с током в магнитном поле в нем будет наводиться э. д. с. Поскольку эта э. д. с. направлена навстречу току, ее называют обратной э. д. с., или противо-э. д. с., и рассматривают как противодействие напряжению, приложенному к проводнику.

Таким образом, между явлением электромагнитной индукции и явлением электромагнитного взаимодействия существует неразрывная связь. Эта связь, впервые установленная русским академиком Э. Х. Ленцем в 1833 г., лежит в основе принципа обратимости электрических машин.

## § 2. ПРИНЦИП ПОЛУЧЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ Э. Д. С.

При вращении рамки в магнитном поле, созданном полюсами постоянных магнитов *N* и *S*, в ее активных сторонах *AA* и *BB* наводятся э. д. с. Направление этих э. д. с. нетрудно определить, воспользовавшись правилом правой руки.

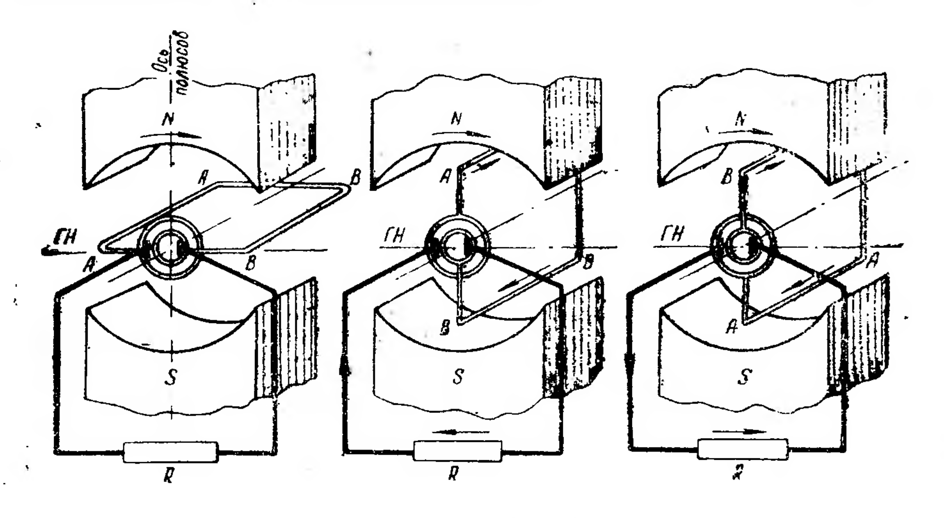



Рис. 3. Принцип получения переменной э. д. с.

Если рамка вращается по часовой стрелке, то в активной стороне, которая перемещается под северным полюсом, будет индуктироваться э. д. с. направлением «от нас», а в активной стороне, проходящей под южным полюсом, — «на нас» (рис. 3). В момент прохождения активных сторон рамки через геометрическую нейтраль *ГН*, которая лежит посередине между полюсами *N*

и $S$ в плоскости, перпендикулярной оси магнитного поля, э. д. с., наводимые в сторонах рамки, изменяют свое направление.

Время $T$, в течение которого происходит полное изменение э. д. с., называется **периодом** э. д. с. (рис. 4).

Число периодов в одну секунду называется **частотой**:

$$f = \frac{1}{T}.$$

Если магнитное поле в машине создается $p$ парами полюсов, то за один оборот в рамке $p$ раз произойдет полное изменение э. д. с.

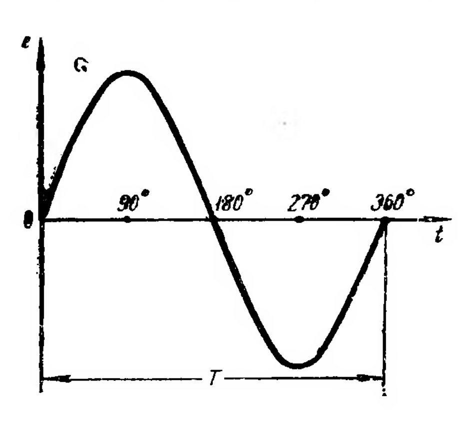



Рис. 4. Кривая э. д. с. витка

Скорость вращения $n$ обычно измеряется числом оборотов в минуту, поэтому в общем случае частота э. д. с. в рамке будет равна:

$$f = \frac{pn}{60}.$$

Так как рамка имеет две активные стороны, э. д. с. которых взаимно складываются, то мгновенное зачение э. д. с. рамки будет определяться формулой

$$e = 2Blv \sin \alpha,$$

где $\alpha$ — угол, под которым активная сторона рамки пересекает линии магнитного поля.

Если концы рамки присоединить к кольцам, а затем к щеткам, расположенным на кольцах, приключить внешнюю цепь $R$, то переменная э. д. с. вызовет в цепи переменный ток.

Для получения во внешней цепи тока постоянного направления присоединим концы рамки к двум изолированным друг от друга полукольцам, которые представляют собой простейший **коллектор** (рис. 5). Тогда при вращении рамки в магнитном поле одновременно с изменением направления э. д. с. в рамке будет изменяться и положение полуколец под щетками. В результате этого верхняя щетка всегда будет находиться в контакте с тем полукольцом, которое соединено с проводником, проходящим под северным полюсом, а нижняя щетка всегда будет находиться в соприкосновении с полукольцом проводника, расположенного под южным полюсом.

Таким образом, несмотря на то, что в рамке будет индуктироваться переменная э. д. с., ток во внешней цепи будет протекать в одном направлении — от нижней щетки к верхней. Величина э. д. с. на щетках и тока во внешней цепи при этом будет изменяться от

максимального значения до нуля, т. е. э. д. с. на щетках и ток в цепи будут пульсирующими (рис. 6). Величина пульсаций, или величина колебания э. д. с. на щетках, определяется обычно в процентах:

$$\varepsilon = \frac{E_{макс} - E_{мин}}{E_{макс} + E_{мин}} 100.$$

В случае одной рамки $\varepsilon = 100\%$, и среднее значение э. д. с. $E_{ср} = 0{,}636E_{макс}$.

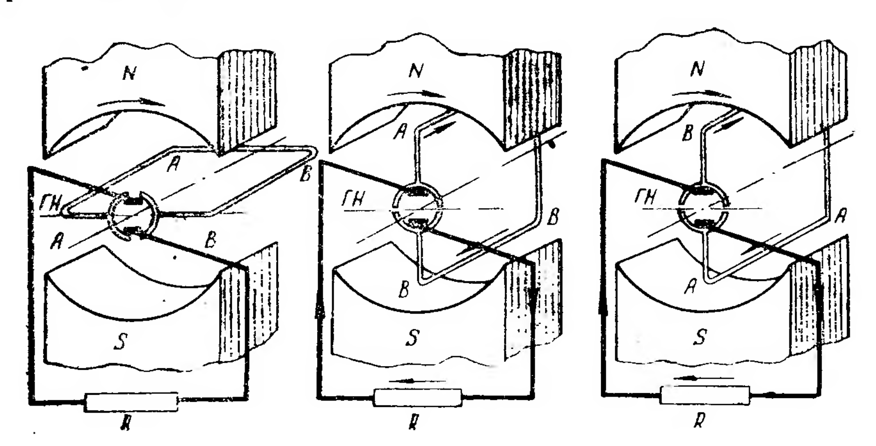



Рис. 5. Принцип выпрямления переменного тока

Чтобы уменьшить величину пульсаций, необходимо увеличить число рамок и соответственно число коллекторных пластин. Так, например, при двух рамках и четырех коллекторных пластинах (рис. 7,*а*) величина пульсаций снижается до $\varepsilon = 17{,}2\%$, а среднее знанение э. д. с. увеличивается до $E_{ср} = 0{,}9E_{макс}$ (рис. 7,*б*). Если число рамок увеличить до шести, то $\varepsilon = 7{,}2\%$ и $E_{ср} = 0{,}96E_{макс}$. При шестнадцати рамках величина пульсаций не превышает 1% и $E_{ср} \approx E_{макс}$, т. е. на щетках будет практически постоянное напряжение и во внешней цепи будет практически постоянный ток.

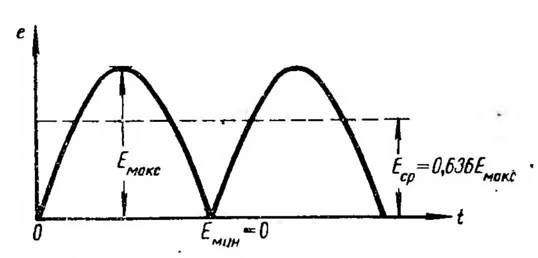



Рис. 6. Кривая выпрямленной э. д. с.

Обмотки, выполненные из отдельных рамок, каждая из которых присоединяется к двум отдельным коллекторным пластинам, называются разомкнутыми обмотками. Применение разомкнутых обмоток не дает большого эффекта, так как напряжение на щетках генератора в этом случае определяется величиной э. д. с. одной

рамки. В связи с этим в машинах постоянного тока вместо разомкнутых обмоток применяют замкнутые обмотки, в которых все рамки соединяются между собой последовательно.

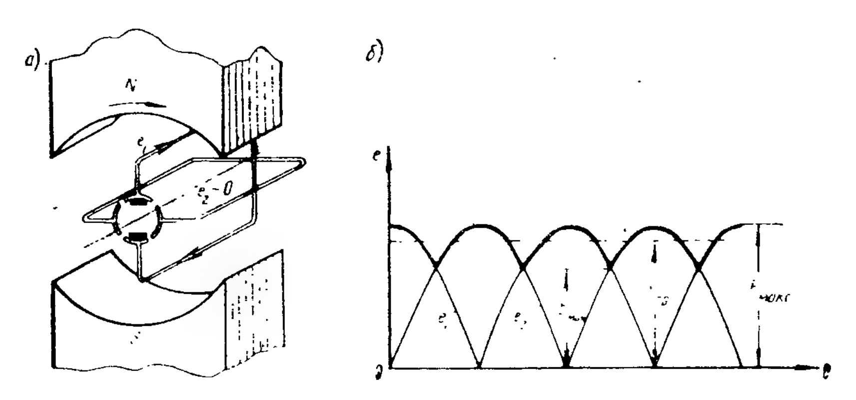



Рис. 7. Элементарный генератор постоянного тока с разомкнутой обмоткой и кривая выпрямленной э. д. с.

Замкнутые обмотки позволяют не только уменьшить пульсации и сократить вдвое число коллекторных пластин, но и дают возможность повысить величину э. д. с. на зажимах генератора.

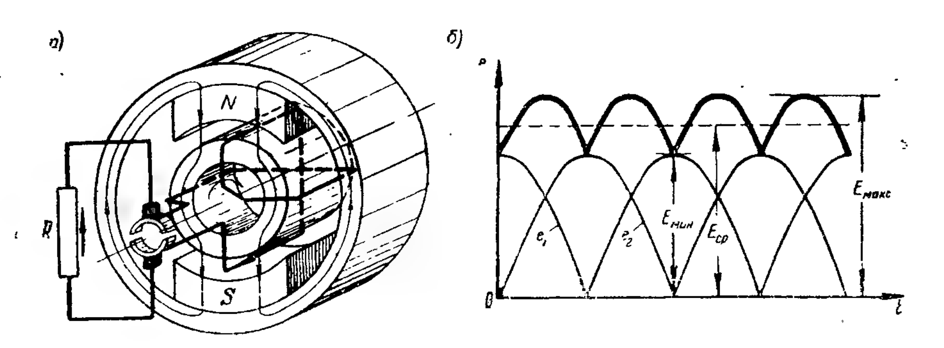



Рис. 8. Элементарный генератор постоянного тока с замкнутой обмоткой и кривая выпрямленной э. д. с.

Простейший генератор постоянного тока с замкнутой обмоткой, выполненной из двух рамок, и кривая выпрямленной э. д. с. изображены на рис. 8.

## § 3. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрическая машина постоянного тока состоит из двух основных частей: индуктора, или магнитной системы, и якоря.

Индуктор служит для создания в электрической машине маг-

нитного поля; в якоре происходит преобразование одного вида энергии в другой, например механической в электрическую или наоборот.

Индуктор является неподвижной частью электрической машины постоянного тока, т. е. ее статором, а якорь представляет собой вращающуюся часть машины, или ее ротор.

## 1. Индуктор

Основными элементами индуктора являются корпус, главные и дополнительные полюсы.

Корпус (станина) является остовом электрической машины. К нему крепятся полюсы и щиты с подшипниками, в которых вращается вал якоря. Часть корпуса, по которой проходит магнитный поток, называется активной частью, или ярмом машины.

Для изготовления корпусов бортовых электрических машин небольшой мощности используют цельнотянутые трубы из низкоуглеродистой стали, которая обладает высокой магнитной проницаемостью.

Корпуса мощных электрических машин выполняются сварными из низкоуглеродистой листовой стали. Для изготовления корпуса стальной лист свертывается в цилиндр, и продольный шов сваривается.

Корпуса бортовых генераторов обычно выполняются в виде моноблока (рис. 9). Моноблок сваривается из двух частей: из активной цилиндрической части *1*, изготовленной из низкоуглеродистой электротехнической стали, и фланцевого щита *2* — из специальной легированной стали, обладающей высокой механической прочностью. На торце щита имеется центрирующий буртик *3* и шесть сквозных отверстий *4* для прохода шпилек, с помощью которых генератор крепится к приводному двигателю. Доступ к шпилькам осуществляется через шесть окон *5*. Эти же окна служат для выхода из генератора охлаждающего воздуха.

С целью улучшения магнитных свойств и снятия механических напряжений, возникающих при сварке и механической обработке, корпуса подвергаются отжигу. Для защиты от коррозии корпуса цинкуются, оксидируются или покрываются специальными лаками.

Главные полюсы электрической машины служат для создания в электрической машине основного магнитного потока. Главный полюс состоит из сердечника, полюсного наконечника и полюсной катушки (рис. 10). Полюсный наконечник позволяет создать необходимый закон распределения магнитной индукции в воздушном зазоре машины и, кроме того, обеспечивает крепление полюсной катушки на полюсе.

Для изготовления полюсов применяют низкоуглеродистую электротехническую сталь, обладающую высокой магнитной проницаемостью. С целью снижения потерь на вихревые токи полюсы обычно выполняют шихтованными, т. е. набирают из отдельных листов

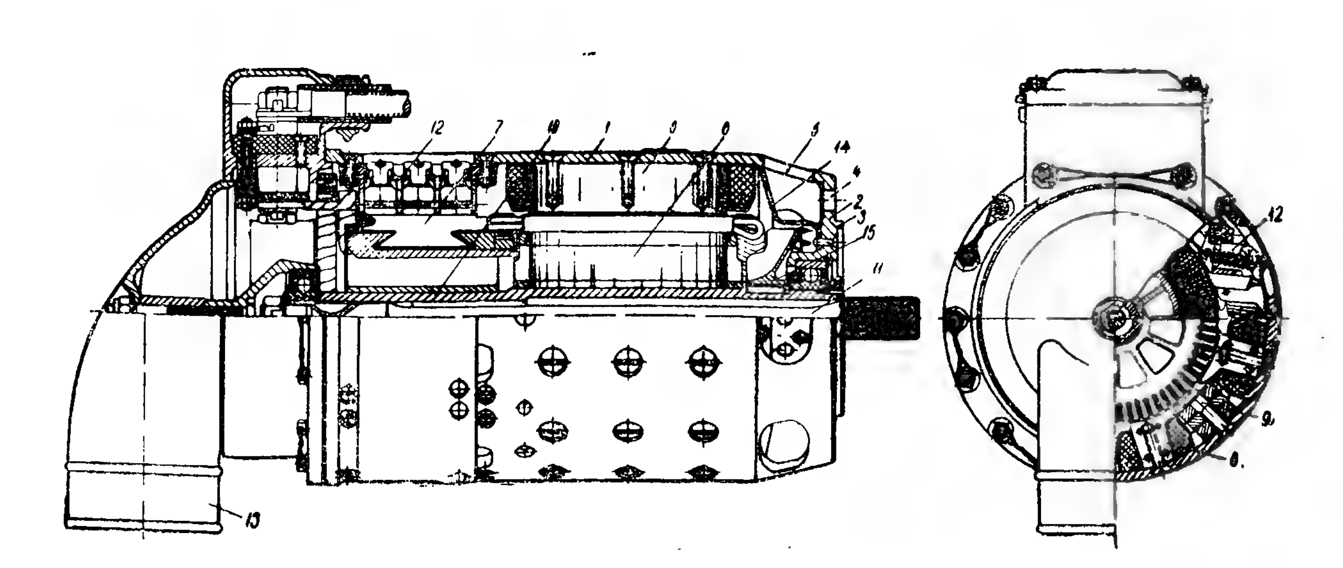



Рис. 9. Устройство бортового генератора постоянного тока:
*1*—корпус (активная часть); *2*—фланцевый щит; *3*—центрирующий буртик; *4*—отверстие для шпильки крепления генератора; *5*—окно для выхода охлаждающего воздуха; *6*—якорь; *7*—коллектор: *8*—главный полюс; *9*—дополнительный полюс; *10* - наружный полый вал; *11*—внутренний упругий вал; *12*—щеткодержатель; *13*—воздухозаборный патрубок; *14*—защитная решетка; *15*—вентилятор

толщиною 0,5—1,5 *мм*. В качестве изоляции между листами используют оксидную пленку, естественно возникающую на поверхности стали при отжиге. Пакеты полюсов собирают на шпильках, которые расклепывают.

В двигателях кратковременного режима работы мощностью до 100 *вт*, у которых потери в стали составляют незначительную часть от общих потерь, полюсы выполняют монолитными.

К корпусу электрической машины полюсы крепятся посредством винтов. Чтобы предупредить самоотвинчивание, производится керновка винтов в шлиц.

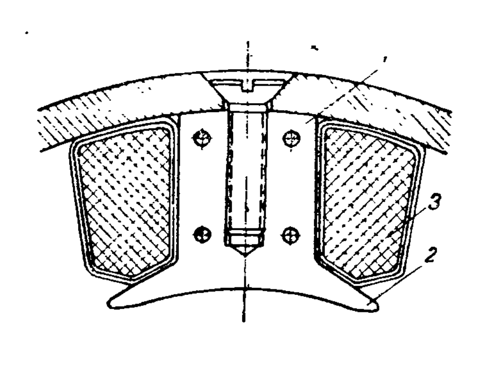



Рис. 10. Главный полюс:
*1*—сердечник полюса; *2*—полюсный наконечник; *3*—полюсная катушка

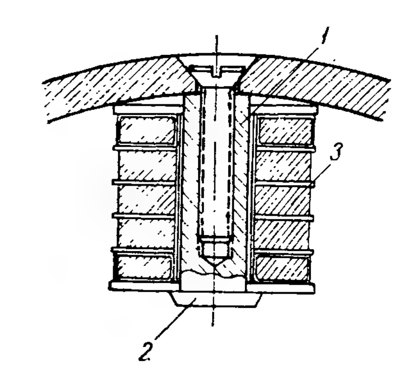



Рис. 11. Дополнительный полюс:
*1*—сердечник полюса; *2*—полюсный наконечник; *3*—полюсная катушка

Для намотки полюсных катушек обычно используют обмоточные провода с эмалевой изоляцией. В современных электрических машинах повышенной теплостойкости для выполнения обмоток возбуждения применяют провода с кремнеорганической изоляцией, допускающие температуры нагрева 250—300 °C.

Между собой полюсные катушки соединяют последовательно специальным гибким многожильным проводом. Для предохранения изоляции от механических повреждений катушки снаружи обматывают лакошелком и хлопчатобумажной лентой, а в случае высоких температур нагрева — липкой стеклолентой, пропитанной кремнеорганическим составом.

В целях улучшения влагостойкости и теплопроводности, а также повышения электрической и механической прочности изоляции полюсные катушки бортовых электрических машин подвергают пропитке специальным пропиточным лаком. После пропитки поверхность полюсных катушек окрашивают покровным лаком.

Дополнительные полюсы электрической машины служат для обеспечения безыскровой работы щеток на коллекторе (см. § 22). Применяются они, как правило, в электрических машинах мощностью от 2 *квт* и выше.

Дополнительные полюсы устанавливаются между главными полюсами на геометрической нейтрали электрической машины. Выполняются они монолитными из полосовой низкоуглеродистой электротехнической стали.

Дополнительный полюс, так же как и главный полюс, состоит из сердечника, полюсного наконечника и полюсной катушки (рис. 11)

Полюсные катушки дополнительных полюсов изготовляются из голой меди прямоугольного сечения. Витки друг от друга и от сердечника полюса изолируются электрокартоном или стекломиканитом. Крайние витки полюсных катушек обматываются лакошелком или липкой стеклолентой. Между собой полюсные катушки, как правило, соединяются последовательно. С целью повышения сопротивления изоляции и обеспечения влагостойкости катушки дополнительных полюсов иногда пропитываются специальным лаком.

## 2. Якорь

Якорь электрической машины постоянного тока состоит из сердечника, обмотки, коллектора и вала (рис. 12).

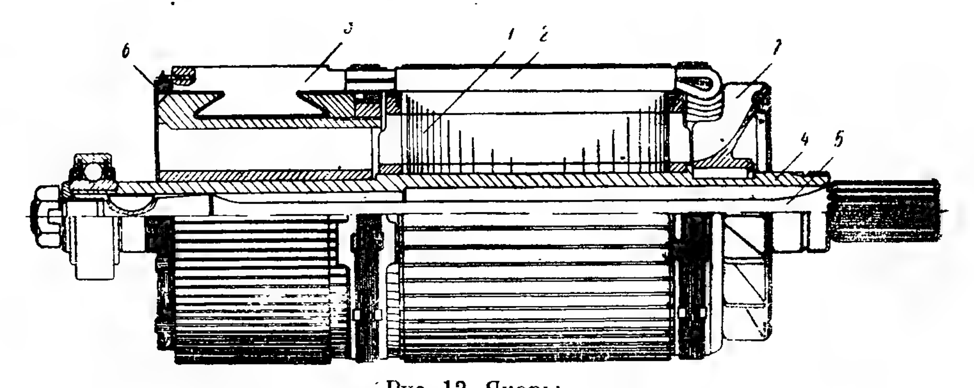



Рис. 12. Якорь:
*1*—сердечник якоря; *2*—обмотка якоря; *3*—коллектор; *4*—наружный полый вал; *5*—внутренний упругий вал; *6*—уравнительные соединения; *7*—вентилятор

Сердечник якоря при вращении в магнитном поле подвергается перемагничиванию, поэтому во избежание больших потерь на гистерезис и вихревые токи он набирается из штампованных листов толщиною 0,35—0,5 *мм* из листовой электротехнической стали, легированной кремнием. Наличие кремния улучшает магнитные свойства стали и увеличивает ее электрическое сопротивление, благодаря чему происходит дальнейшее снижение потерь в якоре на вихревые токи. В листах якоря штампуют пазы для укладки обмотки, отверстие для вала и отверстия для вентиляционных каналов (рис. 13).

В качестве изоляции между листами обычно используют лак и в некоторых случаях оксидную или фосфатную пленку. Чтобы пре-

дохранить изоляцию выступающих из пазов частей обмотки якоря от повреждения, с обеих сторон сердечника якоря помещают листы из изоляционного материала толщиною 1—1,5 *мм*, которые имеют такой же профиль, как листы стали якоря.

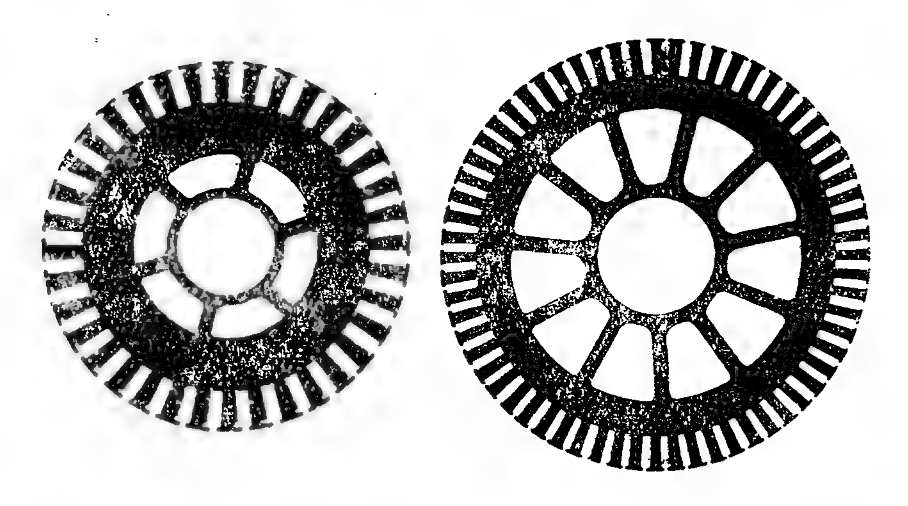


Рис. 13. Листы пакета якоря

Обмотка якоря выполняется из отдельных рамок или, как их обычно называют, секций, которые укладываются в пазы сердечника якоря. Благодаря пазам удается сравнительно просто обеспечить крепление секций на якоре и создать минимальный воздушный зазор между якорем и полюсами. Концы секций припаиваются к коллекторным пластинам чистым оловом или привариваются с помощью аргоно-дуговой сварки.

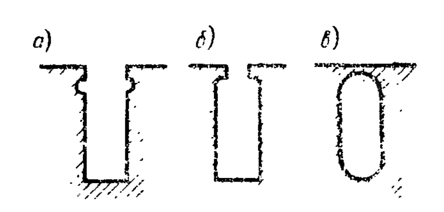



Рис. 14. Пазы якоря:
а) открытый; б) полузакрытый;
в) закрытый

Пазы якоря выполняются открытые, полузакрытые и закрытые (рис. 14). Чаще всего в современных электрических машинах применяют полузакрытые пазы, которые дают возможность легко уложить обмотку и не требуют толстых пазовых клиньев для ее крепления (см. рис. 21). Лобовые части обмотки якоря обычно закрепляются с помощью бандажей из стальной проволоки (см. рис. 12) или из специального мягкого шпагата (у маломощных двигателей).

Обмотки якоря электрических машин небольшой мощности наматывают круглым эмалированным проводом или эмалированным

проводом с шелковой изоляцией. Для намотки якорей мощных электрических машин применяют прямоугольные обмоточные провода с хлопчатобумажной или шелковой изоляцией или теплостойкие провода с кремнеорганической изоляцией. После намотки якори бортовых электрических машин подвергают пропитке специальными пропиточными лаками. Это повышает влагостойкость, улучшает электрическую и механическую прочность изоляции и придает якорю монолитность. Последнее свойство имеет особое значение для бортовых электрических машин в связи с тем, что они рассчитаны на высокие скорости вращения.

Коллектор представляет собой барабан, набранный из отдельных медных пластин клинообразного сечения, которые изолируются друг от друга прокладками из слюды или миканита.

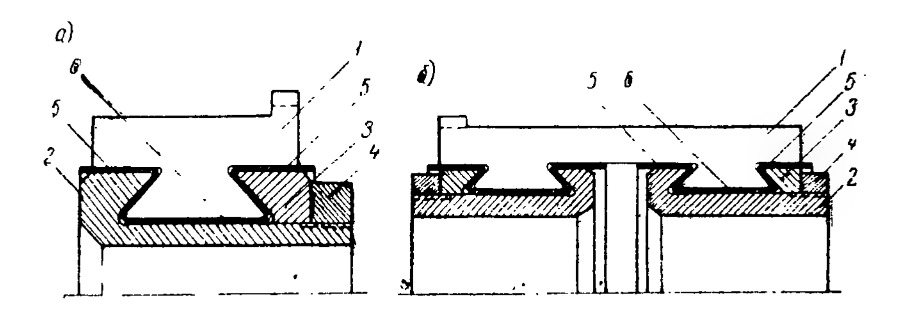



Рис. 15. Коллекторы на металлической втулке:
а) коллектор с одним ласточкиным хвостом; б) коллектор с двумя ласточкиными хвостами;
*1*—коллекторная пластина; *2*—конусная втулка; *3*—нажимная конусная шайба; *4*—нажимная гайка; *5*—изоляционный конус из миканита; *6*—изоляционный цилиндр из стеклоленты

Коллекторные пластины изготовляются из профильной твердотянутой меди или из кадмиевой меди, которая отличается особенно высоким сопротивлением истиранию. Нижней части коллекторной пластины придается форма ласточкиного хвоста, посредством которого и осуществляется ее крепление. В торцовой части пластины фрезеруются шлицы, куда вкладывают концы секций обмотки якоря.

В мощных современных электрических машинах коллекторы выполняются на металлической втулке, которая является основанием коллектора (рис. 15, *а*). От втулки и нажимной конусной шайбы коллекторные пластины изолируются миканитом. При сборке конусные выступы втулки и шайбы входят в конусные вырезы коллекторных пластин и зажимают их. Затягивается коллектор посредством нажимной гайки, которая навинчивается на коллекторную втулку.

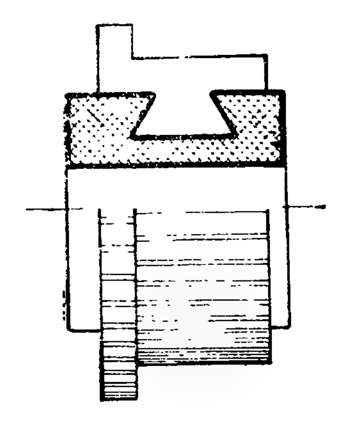
Если коллекторы имеют значительную активную длину и ра-

ботают в напряженном температурном режиме, то для предупреждения выпучивания коллекторных пластин они выполняются с двумя ласточкиными хвостами (рис. 15, *б*).

Коллекторы современных электрических машин небольшой мощности (до 400 *вт*) в большинстве случаев изготовляются на пластмассовой основе. Пластмасса изолирует коллекторные пластины от вала машины и одновременно скрепляет их (рис. 16).

Вал является одной из ответственных деталей электрической машины постоянного тока, поэтому для его изготовления используется высококачественная сталь. Вал изготовляется, как правило, сплошного сечения. На вал напрессовывается сердечник якоря и коллектор.

Поверхность вала, предназначенная для посадки сердечника якоря, покрывается продольной накаткой. При напрессовке зубцы накатки врезаются в металл сердечника якоря, обеспечивая тем самым надежное соединение его с валом. Для посадки коллектора, выполненного на металлической втулке, поверхность вала шлифуется с допуском под прессовую посадку, а для посадки коллектора на пластмассе на поверхности вала делается сетчатая накатка.


**Рис. 16. Коллектор на пластмассе**

По концам вала имеются шейки для посадки шариковых подшипников. Для соединения с исполнительным механизмом один конец вала электродвигателя выполняется свободным.

Вал генератора, приводом которого является авиационный двигатель, выполняется двойным. Он состоит из наружного полого вала, на котором размещаются сердечник якоря и коллектор, и внутреннего упругого вала, который посредством шлицев сочленяется с редуктором двигателя. Для запрессовки пакета якоря и коллектора на поверхности полого вала делается продольная накатка. Между собой упругий и полый вал соединяются при помощи затяжного конуса и шпонки (см. рис. 12). Наличие упругого вала позволяет смягчить толчки и удары, возникающие в результате неравномерного вращения авиационного двигателя, и благодаря этому избежать повреждений редуктора и вала генератора.

### 3. Вспомогательные детали электрической машины постоянного тока

К вспомогательным деталям электрической машины постоянного тока относят: щеткодержатели со щетками, подшипниковые щиты, подшипники и другие детали.

Щеткодержатель состоит из корпуса или обоймы и нажимного устройства (рис. 17). Корпус щеткодержателя штампуется из латуни или отливается из алюминия.

В электрических машинах щеткодержатели обычно размещаются на суппорте и только в некоторых мощных бортовых машинах крепятся непосредственно к корпусу.

Щеткодержатели бывают двух типов: радиальные (рис. 17, *а*) и реактивные (рис. 17, *б*). Радиальные щеткодержатели, в которых щетки располагаются перпендикулярно поверхности коллектора, устанавливаются в электрических машинах с переменным направлением вращения, например в реверсивных двигателях постоянного тока. В реактивных щеткодержателях щетки

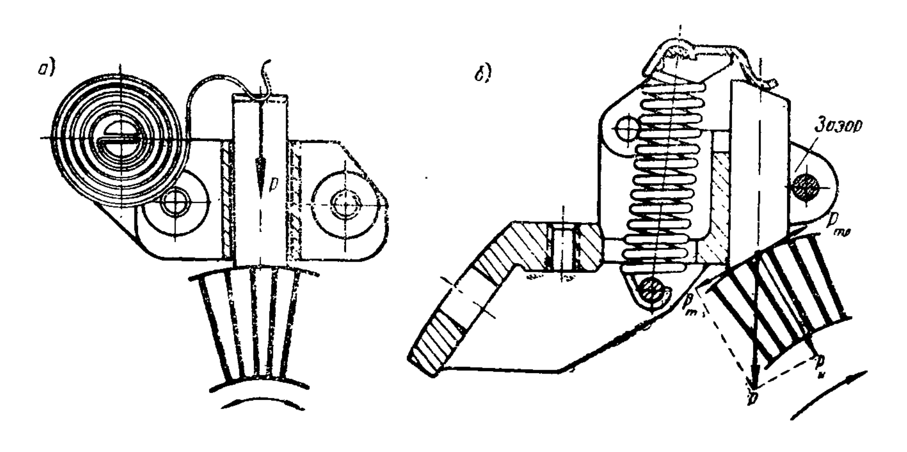



Рис. 17. Щеткодержатели:
а) радиальный; б) реактивный

располагаются под некоторым углом к поверхности коллектора, поэтому эти щеткодержатели применяются в электрических машинах с постоянным направлением вращения, например в бортовых генераторах и преобразователях.

Реактивные щеткодержатели лучше противодействуют вибрациям щеток и поэтому обеспечивают более плотный контакт между щетками и коллектором при высоких скоростях вращения. Они дают возможность получить примерно постоянное давление на щетки независимо от их износа. Кроме того, при соответствующем выборе угла наклона и определенной силе давления на щетки $P$ в реактивном щеткодержателе можно не только уравновесить силу трения $P_{тр}$, касательной составляющей силы давления $P_m$, но и добиться того, что при работе щетки будут прижаты только к передней стенке щеткодержателя, а между остальными стенками и щетками будет зазор (рис. 17, *б*). Это особенно важно для высотных щеток, которые при работе на высоте сильно нагреваются, разбу-

хают и могут заклиниться в щеткодержателе, что приведет к нарушению работы электрической машины.

В бортовых электрических машинах применяют специальные высотные щетки. Чтобы в условиях вибрации и тряски обеспечить плотный контакт между щетками и коллектором, в бортовых электрических машинах допускают значительно большие удельные давления на щетки, чем в наземных машинах (до 500—750 *г/см*²).

Подшипниковые щиты изготовляются из чугуна или алюминиевого сплава. К корпусу электрической машины щиты крепятся при помощи болтов или стяжных шпилек. В центре каждого щита выполняется гнездо для посадки подшипника и отверстие для прохождения вала якоря. Для обеспечения надежной посадки подшипника в щит запрессовывается стальная втулка. В электрических машинах применяются радиальные шариковые и роликовые подшипники открытого и закрытого типа.

У маломощных бортовых электрических машин на внутренней поверхности щита со стороны коллектора размещается пластмассовый суппорт с латунными щеткодержателями. Чтобы можно было поворачивать суппорт, в щите иногда выполняются овальные отверстия, сквозь которые проходят винты крепления суппорта.

## § 4. НОМИНАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ

Электрическая машина всегда предназначается для определенного режима работы, который называется **номинальным режимом**. При этом режиме машина должна работать в течение всего срока службы.

Величины, характеризующие номинальный режим работы машины, называются **номинальными данными**. К ним относятся: номинальная мощность, номинальное напряжение, номинальный ток и номинальная скорость вращения. Номинальные данные указываются в формуляре машины, а иногда и на ее заводском щитке.

Термин «номинальный» может применяться и к другим величинам, не указанным в формуляре машины, но характеризующим ее работу в номинальном режиме, например номинальный момент вращения, номинальный коэффициент полезного действия, номинальный ток возбуждения и т. д.

Под номинальной мощностью электрической машины всегда понимают ее полезную мощность, выраженную в ваттах или киловаттах. Для генератора это будет электрическая мощность, отдаваемая во внешнюю сеть, а для двигателя это будет механическая мощность на валу.

В таблицах 1 и 2 приведены номинальные данные некоторых генераторов и двигателей постоянного тока, применяемых на летательных аппаратах.

*Таблица 1*

| Тип генератора | ГСР-3000 | ГСР-6000 | ГСР-9000 | ГСР-12000 | ГСР-18000 |
|---|---|---|---|---|---|
| Номинальная мощность, *квт* . . . . . | 2,85 | 5,7 | 8,55 | 11,4 | 17,1 |
| Номинальное напряжение, *в* | 28,5 | | | | |
| Номинальный ток, *а* . . . . | 100 | 200 | 300 | 400 | 600 |
| Рабочий диапазон скоростей вращения, *об/мин* . . . . | 4000 — 9000 | | | | 3800 — 9000 |
| Система возбуждения . . . | Параллельная | | | | |
| Режим работы . . . . . | Продолжительный | | | | |
| К. п. д., % | 74,0 | 76,3 | 76,0 | 76,7 | 79,0 |
| Вес не более, *кг* . . . . . . | 11,2 | 18,0 | 24,0 | 28,6 | 41,5 |

*Таблица 2*

| Тип двигателя | МУ-110 | Д-7 | Д-32 | МУ-102А | МГП-100 | Д-200 | МУ-331 | Д-1500 | Д-1700 | Д-2500 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Номинальная мощность, *вт* | 5,0 | 7,5 | 32,0 | 70 | 110 | 180 | 400 | 800 | 1700 | 2500 |
| Номинальное напряжение, *в* | 24,0 | 27,5 | 27,0 | 27,0 | 26,0 | 24,0 | 26,0 | 24,0 | 24,0 | 24,0 |
| Потребляемый ток не более, *а* | 1,0 | 0,7 | 2,4 | 7,0 | 7,2 | 12,0 | 30,0 | 65,0 | 110,0 | 170 |
| Номинальная скорость вращения, *об/мин* | 5500 | 7000 | 12500 | 3500 | 7000 | 2500 | 1100 | 4000 | 4000 | 2300 |
| Номинальный момент на валу, *кгсм* | 0,088 | 0,105 | 0,2 | 1,95 | 1,5 | 7,0 | 3,4 | 20,0 | 41,5 | 107,0 |
| Система возбуждения | Последовательная | Последовательная | Последовательная | Последовательная | Последовательная | Параллельная | Последовательная | Смешанная | Последовательная | Последовательная |
| Режим работы | Повторно-кратковр. | Продолж. | Продолж. | Повторно-кратковр. | Продолж. | Продолж. | Повторно-кратковр. | Продолж. | Кратковр. | Повторно-кратковр. |
| Вес не более, *кг* | 0,36 | 0,51 | 0,52 | 1,4 | 1,8 | 4,2 | 1,88 | 10,0 | 10,0 | 11,5 |

## § 5. УСЛОВИЯ РАБОТЫ И ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К БОРТОВЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ МАШИНАМ

Современные летательные аппараты совершают полеты на очень больших высотах, при любой погоде и в сложной метеорологической обстановке, поэтому работа бортовых электрических машин протекает в сложных и крайне неблагоприятных условиях.

Резкие колебания температуры вызывают дополнительные механические напряжения в отдельных частях электрической машины, сокращают срок службы изоляции и затрудняют охлаждение машины.

С увеличением высоты снижается плотность воздуха и увеличивается степень его ионизации. Это ухудшает отвод тепла от машины и приводит к усиленному искрообразованию на коллекторе.

Влага вызывает коррозию металлических частей и снижает электрическое сопротивление изоляции машины. Пары топлива и масла оказывают еще более вредное влияние на изоляцию. Они ухудшают ее изоляционные свойства, а в некоторых случаях даже разрушают изоляцию. Песок и пыль, проникая в электрическую машину, вызывают преждевременный износ щеток, коллектора и подшипников.

Вибрации и тряска, а также динамические силы, возникающие вследствие ускорений при взлете, посадке, виражах и пикировании летательного аппарата, затрудняют нормальную работу щеточного узла и создают дополнительные механические напряжения в отдельных деталях электрической машины, которые неблагоприятно сказываются на ее механической прочности.

Значительная часть электрических машин выполняет настолько ответственные функции, что в случае выхода их из строя дальнейший полет становится невозможным. Поэтому к электрическим машинам самолетов и ракет предъявляются особые повышенные требования, совершенно отличные от требований, предъявляемых к наземным электрическим машинам.

К бортовым электрическим машинам предъявляют следующие основные тактико-технические требования:

а) максимальная надежность в работе при всех условиях, в которых может находиться летательный аппарат;

б) минимальный вес и габаритные размеры;

в) высокая механическая, электрическая и термическая прочность и хорошая химическая стойкость;

г) отсутствие помех для работы радиооборудования;

д) простота ухода и эксплуатации, возможность быстрой смены деталей и удобство монтажа на летательных аппаратах.

Чтобы при минимальных габаритных размерах и весе бортовые электрические машины были надежны и безотказны в работе, для их изготовления применяют высококачественные материалы, обладающие высокими механическими, магнитными и электрическими свойствами, стойкие к коррозии и вибрациям, к тряске и

резким колебаниям температуры. С этой же целью в бортовых электрических машинах допускают повышенные механические напряжения и более высокие температуры нагрева.

Вследствие механических и температурных напряжений срок службы бортовых электрических машин значительно сокращается.

---

*ГЛАВА II*

# ОБМОТКИ ЯКОРЯ И МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

## § 6. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБМОТКАХ ЯКОРЯ

Обмоткой якоря называют совокупность проводников, уложенных в пазы якоря и соединенных между собой и коллекторными пластинами по определенной схеме.

Часть обмотки, которая заключена между двумя коллекторными пластинами, называется секцией. Секция может иметь один, два или несколько последовательно соединенных витков.

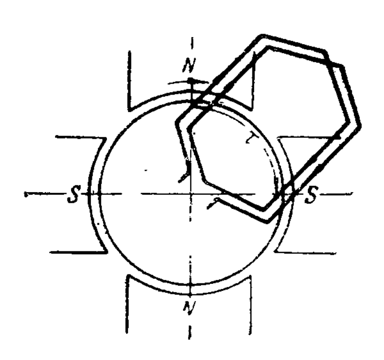


Рис. 18. Расположение сторон секций обмотки на якоре

Части секции, уложенные в пазы якоря и пересекающие при вращении якоря линии магнитного поля, называются активными сторонами секции. Части секции, находящиеся вне пазов, которые не принимают участия в создании э. д. с., а только служат для соединения между собой активных сторон секции, называются лобовыми частями. Следовательно, каждая секция имеет две активные стороны и две лобовые части.

Для того чтобы э. д. с., наводимые в активных сторонах секции, складывались, их располагают в пазах под соседними полюсами разной полярности (рис. 18). Ширина секции при этом должна быть примерно равна полюсному делению электрической машины $\tau$, которое представляет собой расстояние по окружности якоря между серединами соседних полюсов:

$$\tau = \frac{\pi D_я}{2p},$$

где $D_я$ — диаметр якоря;

$p$ — число пар полюсов.

Ширину секции обозначают $y_1$ и называют первым частичным шагом.

Обмотка якоря обычно выполняется двухслойной. Каждая секция укладывается в пазы таким образом, чтобы одна активная сторона ее находилась в нижней части паза, а другая в верхней (рис. 19). Это дает возможность избежать пересечений лобовых

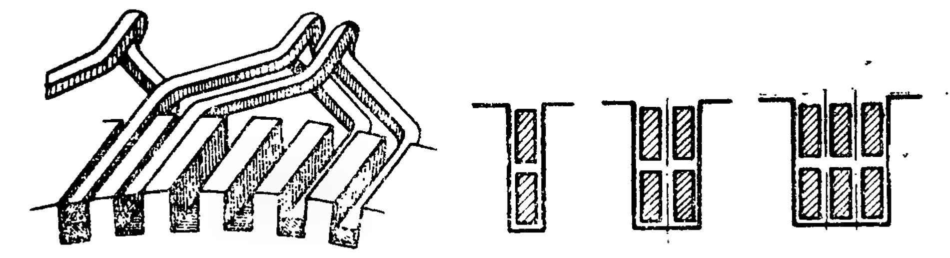


Рис. 19. Укладка секций в пазы якоря

Рис. 20. Элементарные пазы якоря

частей секций, вдвое сократить число пазов и изготовлять секции по шаблону.

Минимальное число активных сторон секций, которое может быть уложено в паз якоря в два слоя, равно двум. Такой паз условно называют элементарным пазом. В случае, если в пазу находится четыре, шесть и более активных сторон секций, то реальный паз можно рассматривать как совокупность двух, трех или более элементарных пазов (рис. 20).

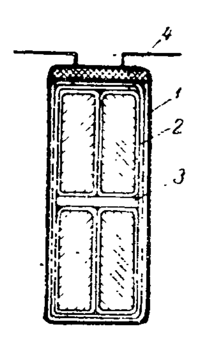



Рис. 21. Изоляция паза: 1—наружная пазовая гильза; 2—внутренняя пазовая гильза; 3—прокладка; 4—клин

Пазы якоря тщательно изолируются (рис. 21). В качестве пазовой изоляции используется электрокартон и лакошелк, а в машинах повышенной теплостойкости — стеклослюденит и фторопласт. Пазовые клинья выполняют из электрокартона, текстолита и дерева, а при высоких температурах нагрева — из стеклотекстолита.

Первый частичный шаг обмотки обычно измеряется числом элементарных пазов, заключенных между активными сторонами секции. Если электрическая машина имеет $Z_{эл}$ элементарных пазов и $2p$ полюсов, то первый частичный шаг обмотки

$$y_1 = \frac{Z_{эл}}{2p}.$$

Так как шаг обмотки $y_1$ должен быть равен целому числу, а $Z_{эл}$ не всегда делится на $2p$ без остатка, то $y_1$ определяют по формуле

$$y_1 = \frac{Z_{эл}}{2p} \mp \varepsilon,$$

где $\varepsilon$ — число долей элементарного паза, на которое нужно уменьшить ($-\varepsilon$) или увеличить ($+\varepsilon$) ширину секции относительно полюсного деления $\tau$, чтобы $y_1$ был бы целым числом.

Если $y_1=\tau$, обмотка называется обмоткой с диаметральным шагом. При $y_1<\tau$ обмотка будет с укороченным шагом, а при $y_1>\tau$ — с удлиненным шагом.

На практике получили применение первые два типа обмоток, особенно обмотка с укороченным шагом, которая, несколько уступая диаметральной обмотке в отношении величины э. д. с., имеет меньшие лобовые соединения. Обмотка с удлиненным шагом из-за повышенного расхода меди на лобовые части не применяется.

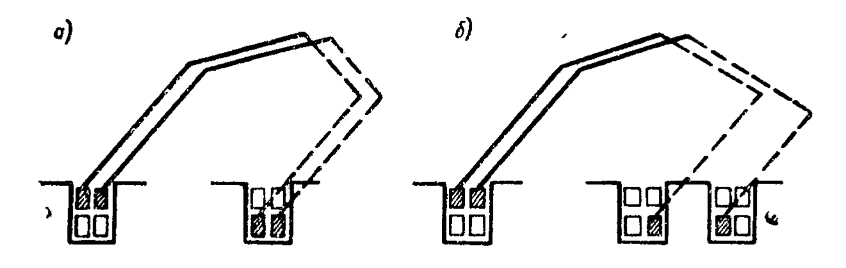



Рис. 22. Обмотка якоря:
а) равносекционная; б) ступенчатая

Обмотки якоря современных электрических машин постоянного тока в большинстве случаев выполняются из секций одинаковой ширины, но в некоторых случаях, особенно в машинах значительной мощности, применяют так называемую ступенчатую обмотку, секции которой имеют разную ширину (рис. 22).

В замкнутой обмотке якоря к каждой коллекторной пластине присоединяются концы активных сторон двух секций, поэтому число коллекторных пластин $K$ всегда равно числу секций $S$, т. е.

$$K=S.$$

Если принять во внимание, что при двухслойной обмотке в каждом элементарном пазу находятся две активные стороны секции, то

$$Z_{эл}=K=S.$$

Обмотки якоря машин постоянного тока в зависимости от способа соединения секций подразделяются на простые петлевые, простые волновые, сложные петлевые и сложные волновые. В бортовых электрических машинах применяются только простые петлевые и простые волновые обмотки.

## § 7. ПРОСТАЯ ПЕТЛЕВАЯ ОБМОТКА

Простой петлевой обмоткой якоря называется такая обмотка, у которой концы секции присоединяются к двум рядом лежащим коллекторным пластинам (рис. 23). При выполнении этой обмотки секции между собой соединяются последовательно в том порядке, в котором они уложены на якоре. Соединенные таким образом секции образуют петли, поэтому обмотка получила наименование петлевой.

Для того чтобы выполнить обмотку якоря, необходимо знать шаги обмотки.

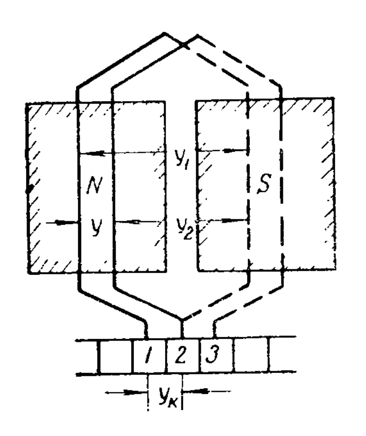



Рис. 23. Соединение секций в петлевой обмотке

Первый частичный шаг обмотки якоря $y_1$, как уже известно, равен ширине секции.

Второй частичный шаг обмотки якоря $y_2$ представляет собой расстояние между второй активной стороной первой секции и первой активной стороной второй секции.

Результирующий шаг обмотки якоря $y$ равен расстоянию между первыми активными сторонами двух следующих друг за другом секций.

Шаги обмотки якоря принято измерять числом элементарных пазов.

Шаг по коллектору $y_к$ представляет собой расстояние, измеренное числом коллекторных пластин, между началом и концом секции.

Из определения простой петлевой обмотки следует, что

$$y = y_к = 1,$$

$$y_2 = y_1 - y.$$

Рассмотрим следующий пример. Предположим, что электрическая машина имеет четыре полюса и двенадцать пазов, в которые уложены двенадцать одновитковых секций, т. е. $2p = 4$, $Z = 12$, $S = 12$. Тогда, исходя из этих данных, имеем:

первый частичный шаг обмотки

$$y_1 = \frac{Z_{эл}}{2p} \mp \varepsilon = \frac{12}{4} = 3;$$

результирующий шаг и шаг по коллектору

$$y = y_к = 1;$$

второй частичный шаг

$$y_2 = y_1 - y = 3 - 1 = 2.$$

На рис. 24 представлена в разрезе электрическая машина. В пазах машины кружками изображены активные стороны секций. Задние лобовые части обмотки, находящиеся с противоположной стороны сердечника якоря, показаны пунктиром, а передние лобовые части, которыми активные стороны секций соединяются с коллекторными пластинами, изображены сплошными линиями. Для удобства построения схемы обмотки пазы и коллекторные пластины пронумерованы.

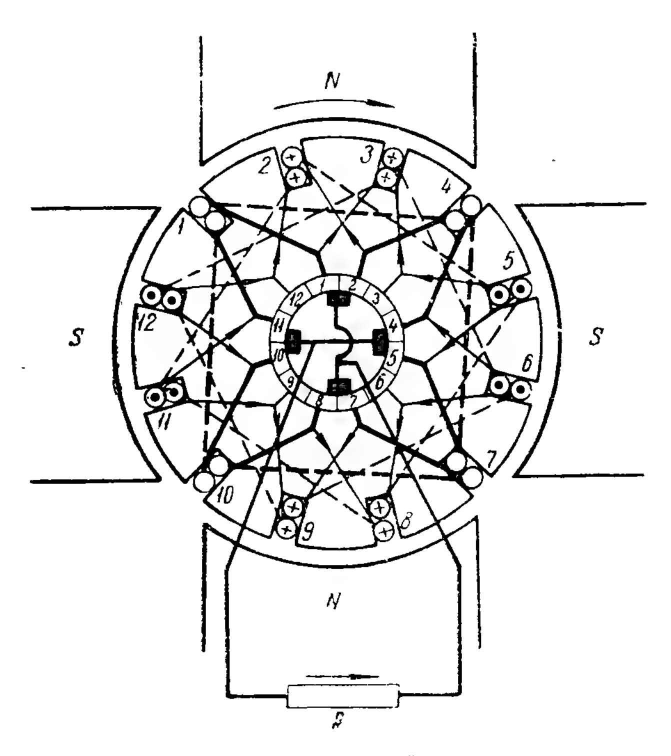



Рис. 24. Радиальная схема простой петлевой обмотки: $2p = 4$, $Z = 12$, $S = 12$

Начало первой секции размещаем в верхней части первого паза и присоединяем к коллекторной пластине *1*. Конец секции укладываем в нижнюю часть паза *4* и соединяем с коллекторной пластиной *2*. Секцию на якоре размещаем симметрично относительно коллекторных пластин, к которым она присоединена. Стороны следующей секции укладываем соответственно в верхнюю часть паза *2* и нижнюю часть паза *5*, т. е. вторую секцию смещаем вправо относительно первой на один паз по якорю и на одну коллекторную

пластину. Концы секции присоединяем к коллекторным пластинам *2* и *3*. Аналогичным путем размещаем в пазах якоря и остальные секции. После того как в пазы будет уложена последняя двенадцатая секция, обмотка должна замкнуться.

Если теперь воспользоваться правилом правой руки и выяснить направление э. д. с., индуктируемых в активных сторонах секций, то можно определить место установки щеток. Щетки, очевидно, нужно разместить на тех коллекторных пластинах, у которых при обходе обмотки якоря э. д. с. меняет свое направление. В этом случае секции будут замыкаться накоротко щетками в момент прохождения геометрической нейтрали якоря, когда индуктируемая в них э. д. с. равна нулю.

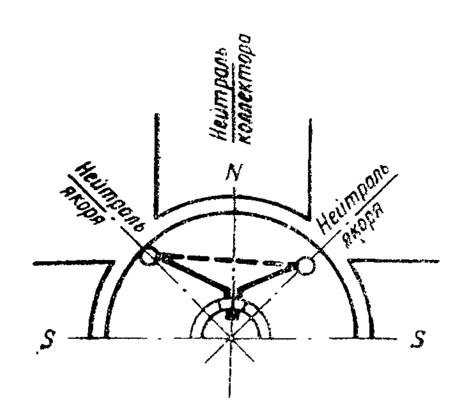



Рис. 25. Расположение щеток на коллекторе

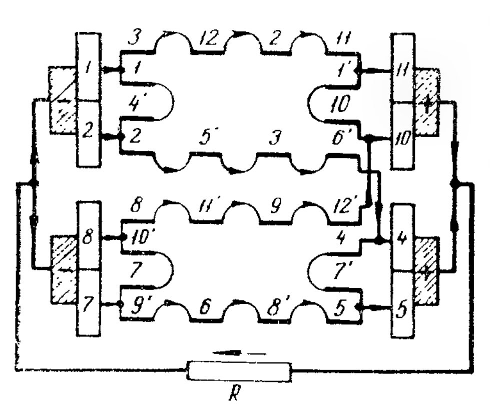



Рис. 26. Схема параллельных ветвей простой петлевой обмотки

Вследствие симметричной формы секций нейтраль коллектора, на которой размещены щетки, совпадает не с нейтралью якоря, а с осью полюсов (рис. 25).

Щетки одной полярности соединяются между собой шинками и к ним приключается внешняя сеть. В генераторе щетки, от которых ток уходит во внешнюю сеть, называются положительными, а щетки, к которым ток притекает из сети, — отрицательными.

Секции, заключенные между разноименными щетками, образуют параллельные ветви обмотки якоря. Схема параллельных ветвей обмотки с распределением тока в них представлена на рис. 26. На схеме активные стороны секций изображены прямыми линиями, а лобовые части дугами. Для удобства активные стороны обозначены теми же цифрами, что и пазы, в которые они уложены, причем нижние стороны в отличие от верхних обозначены цифрами со штрихами.

Как видно из схемы, обмотка якоря имеет четыре параллельные ветви, т. е. столько же, сколько у машины полюсов. Так как при

петлевой обмотке на каждый полюс электрической машины приходится одна параллельная ветвь, то в общем случае при наличии у машины $2p$ полюсов обмотка будет иметь $2a$ параллельных ветвей, т. е.

$$2a = 2p,$$

где $a$ — число пар параллельных ветвей.

Э. д. с. на зажимах электрической машины будет определяться величиной э. д. с., наводимой в параллельной ветви, а ток якоря $I_я$ будет равен сумме токов параллельных ветвей $i_я$, т. е.

$$I_я = 2ai_я.$$

Число щеток (щеточных пальцев) на коллекторе при петлевой обмотке всегда должно соответствовать числу параллельных ветвей или числу полюсов.

Каждая из параллельных ветвей петлевой обмотки располагается под своей парой полюсов. Поэтому в случае магнитной несимметрии, причиной которой может быть неоднородность материала магнитной цепи или различный воздушный зазор, получающийся в результате срабатывания подшипников или плохой сборки электрической машины, магнитный поток, замыкающийся через ту или другую пару полюсов, будет иметь различную величину. В результате этого в параллельных ветвях обмотки будут наводиться различные э. д. с. и между параллельными ветвями возникнут **уравнительные токи**, которые, протекая через щетки, будут вызывать усиленное искрение под щетками и создавать дополнительные потери в якоре.

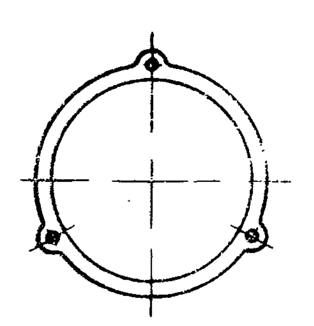


**Рис. 27. Уравнительное соединение при** $2p = 2a = 6$

Для того чтобы разгрузить щетки от уравнительных токов, петлевые обмотки снабжаются так называемыми **уравнительными соединениями**, которые представляют собой медные кольца с ушками (рис. 27). Этими кольцами соединяют между собой те коллекторные пластины, которые в обычных условиях должны иметь одинаковые потенциалы. Такими коллекторными пластинами в настоящем случае являются пластины *1* и *7*, *2* и *8*, *3* и *9* и т. д. (см. рис. 24). Так как каждая параллельная ветвь имеет только одну точку данного потенциала, то общее число точек равного потенциала в обмотке всегда равно $a$.

Уравнительные токи являются переменными токами. При прохождении по обмотке якоря они создают такие магнитные потоки, которые по закону Ленца стремятся выравнять магнитное поле машины.

Обычно для большей наглядности схему обмотки якоря вычерчивают в развернутом виде (рис. 28). Для этого обмотку якоря и коллектор мысленно разрезают и разворачивают на плоскость. Диаметр коллектора при этом принимают равным диаметру якоря. Активные стороны секций, уложенные в верхние части паза, на схеме изображают сплошными линиями, а активные стороны, размещенные в нижней части паза, — пунктиром: Секции, замкнутые в данный момент щетками накоротко, показывают толстыми линиями. Полюсы электрической машины изображают в виде прямоугольников. Щетки размещают под серединами полюсов.

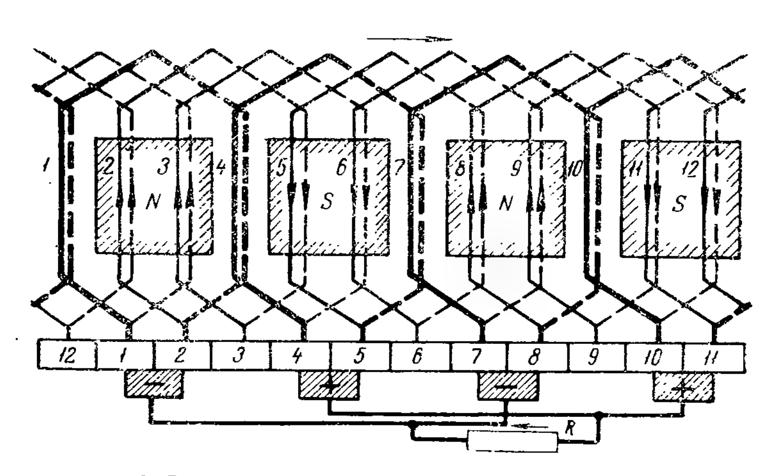



Рис. 28. Развернутая схема простой петлевой обмотки: $2p = 4$, $Z = 12$, $S = 12$

## § 8. ПРОСТАЯ ВОЛНОВАЯ ОБМОТКА

Простой волновой обмоткой якоря называется обмотка, которая получается путем последовательного соединения секций, расположенных под разными парами полюсов (рис. 29). При таком соединении секций образуется подобие волновой линии, откуда обмотка и получила название волновой.

Волновая обмотка может быть выполнена только в многополюсных электрических машинах.

После первого полного обхода по якорю очередная секция оказывается рядом с первой секцией. Если эта секция располагается левее первой, то обмотка называется левой и неперекрещивающейся, если правее ее, то обмотка будет правой и перекрещивающейся. На практике обычно применяется первая обмотка.

Волновая обмотка, так же как и петлевая, характеризуется шагами $y_1$, $y_2$, $y$ и $y_к$.

Первый частичный шаг обмотки определяется по известной формуле

$$y_1 = \frac{Z_{эл}}{2p} \mp \varepsilon.$$

Результирующий шаг обмотки

$$y = \frac{Z_{эл} \mp 1}{p}.$$

Знак минус при единице означает, что обмотка левая и неперекрещивающаяся, а знак плюс, что обмотка правая и перекрещивающаяся.

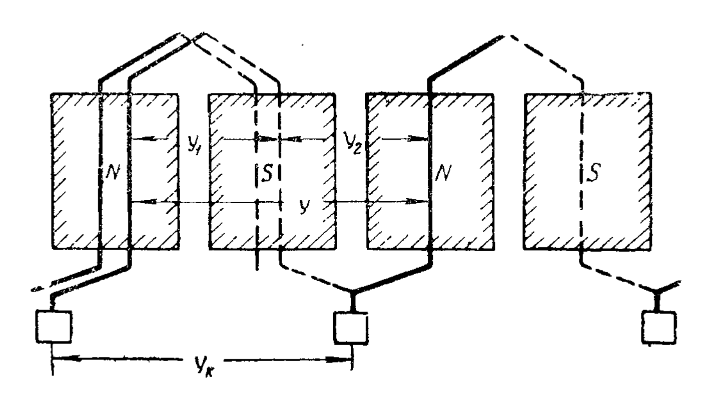



Рис. 29. Соединение секций в волновой обмотке

Второй частичный шаг обмотки

$$y_2 = y - y_1.$$

Шаг по коллектору

$$y_к = \frac{K \mp 1}{p}.$$

Так как $y_к$ и $y$ должны быть целыми числами, то простая волновая обмотка в отличие от петлевой обмотки может быть выполнена только при определенном соотношении между $K$ и $p$.

Предположим, что электрическая машина постоянного тока имеет: $2p = 4$, $Z = 13$ и $S = 13$. Тогда шаги обмотки будут соответственно равны:

$$y_1 = \frac{Z_{эл}}{2p} \mp \varepsilon = \frac{13}{4} - \frac{1}{4} = 3;$$

$$y = y_к = \frac{K \mp 1}{p} = \frac{13 - 1}{2} = 6;$$

$$y_2 = y - y_1 = 6 - 3 = 3.$$

Построение радиальной схемы этой обмотки производим, придерживаясь той же последовательности, что и при построении схемы петлевой обмотки.

Первую секцию укладываем под первой парой полюсов в верхнюю часть паза *1* и в нижнюю часть паза *4*. Концы секции присоединяем к коллекторным пластинам *1* и *7*. После этого переходим под вторую пару полюсов и в пазах *7* и *10* размещаем вторую секцию. Начало этой секции присоединяем к коллекторной пластине *7*,

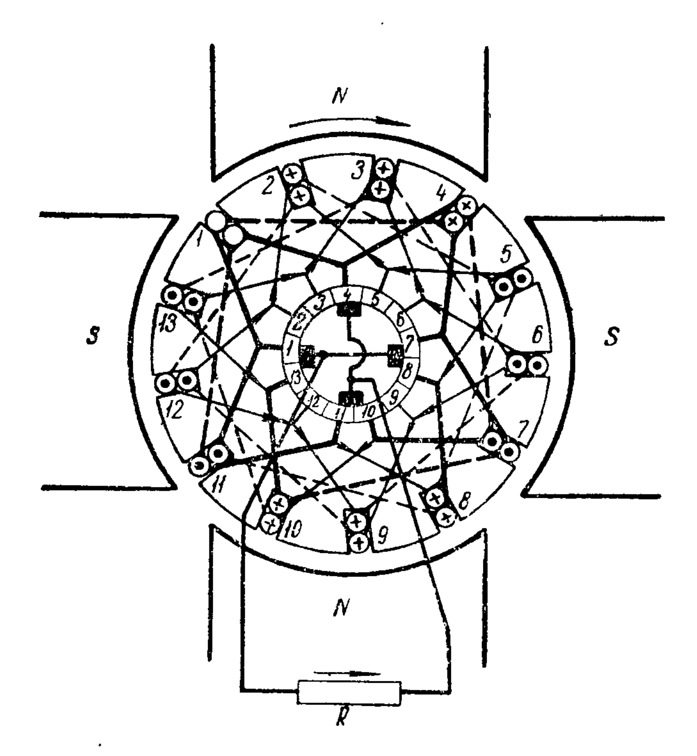



**Рис. 30. Радиальная схема простой волновой обмотки:**
**$2p = 4$, $Z = 13$, $S=13$**

а конец — к коллекторной пластине *13*. Аналогичным путем укладываем остальные секции обмотки. Щетки так же, как при петлевой обмотке, размещаем под серединой полюсов (рис. 30).

На рис. 31 эта же обмотка представлена в развернутом виде. Толстыми линиями на схеме показаны секции, замкнутые щетками накоротко.

Рассматривая схемы на рис. 30 и рис. 31, нетрудно убедиться, что простая волновая обмотка независимо от числа полюсов всегда имеет только две параллельные ветви, т. е. $2a = 2$ или $a = 1$.

Схема параллельных ветвей простой волновой обмотки с распределением тока в них изображена на рис. 32.

Напряжение на зажимах электрической машины определяется величиной э. д. с., наводимой в параллельной ветви, а ток якоря равен удвоенному току параллельной ветви:

$$I_я = 2i_я.$$

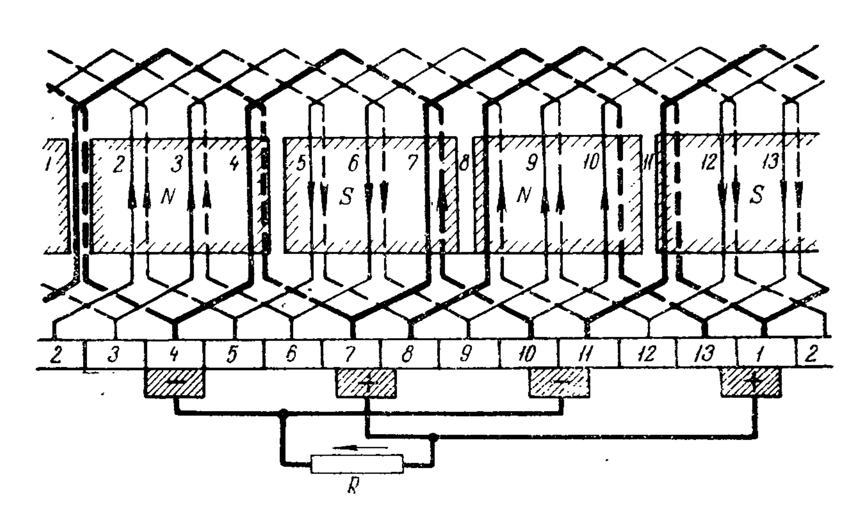



Рис. 31. Развернутая схема простой волновой обмотки: $2p=4$, $Z=13$, $S=13$

Каждая параллельная ветвь простой волновой обмотки размещается под всеми полюсами машины, поэтому волновая обмотка нечувствительна к магнитной несимметрии.

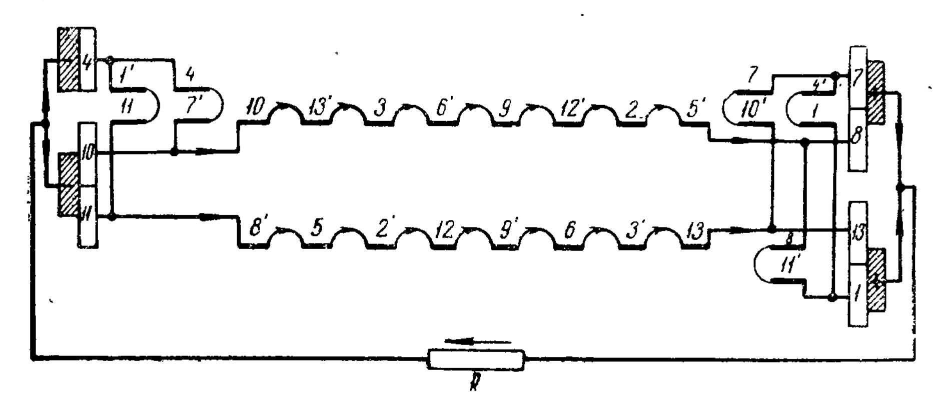



Рис. 32. Схема параллельных ветвей простой волновой обмотки

Следует также заметить, что наличие у простой волновой обмотки только двух параллельных ветвей позволяет ограничиться установкой на коллекторе одного комплекта щеток разной поляр-

ности. Однако обычно применяют полное число щеток (щеточных пальцев), равное числу полюсов. Это дает возможность снизить величину тока, протекающего через щетки, и сократить длину коллектора.

## § 9. ВЫБОР ТИПА ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Выбор типа обмотки якоря для электрических машин производится, исходя из их номинальной мощности, максимально допустимого тока в параллельной ветви и режима работы.

Маломощные электрические машины (мощностью до 500 *вт*) из конструктивных соображений выполняются двухполюсными, поэтому у них применяется только простая петлевая обмотка.

Наиболее выгодной с точки зрения экономии меди, габаритов и веса является простая волновая обмотка, имеющая только две параллельные ветви и, следовательно, наименьшее число активных проводников. Она обычно применяется в электрических машинах средней мощности.

Современные электрические машины значительной мощности с номинальным током более 300 *а* выполняются, как правило, многополюсными с простой петлевой обмоткой. При этом число полюсов и, следовательно, число параллельных ветвей у них выбирается с таким расчетом, чтобы ток в параллельной ветви не превышал максимально допустимой величины 150 *а*.

## § 10. Э. Д. С. ОБМОТКИ ЯКОРЯ

В различных точках воздушного зазора электрической машины магнитная индукция имеет неодинаковые значения. Максимальная магнитная индукция $B_\delta$ будет непосредственно под полюсным наконечником; к краям полюсного наконечника магнитная индукция несколько снижается, а затем резко падает. На геометрической нейтрали машины магнитная индукция равна нулю (рис. 33).

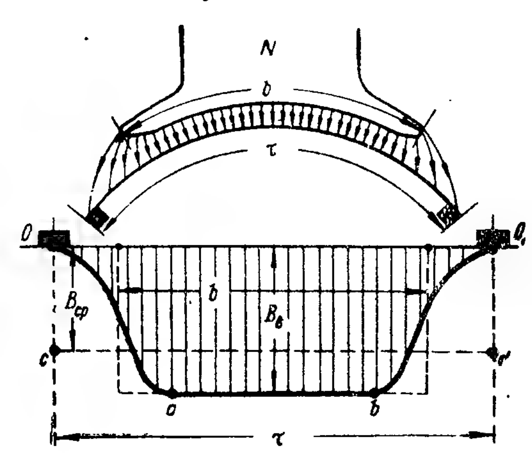



Рис. 33. Кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре электрической машины

Среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{ср}$ можно определить, если площадь $OabO_1$, ограниченную трапецеидальной кривой, заменить равновеликим прямоугольником $OcdO_1$ с основанием, равным полюсному делению $\tau$.

Э. д. с. обмотки якоря определяют как сумму средних значений э. д. с., наводимых в активных проводниках, составляющих параллельную ветвь, т. е.

$$E = \Sigma e_{ср}.$$

Среднее значение э. д. с. в проводнике по закону электромагнитной индукции равно:

$$e_{ср} = B_{ср} l v,$$

где $l$ — длина активного проводника, равная примерно длине сердечника якоря ($l \approx l_я$);

$v$ — окружная скорость вращения якоря.

Если в пазах якоря уложено $N$ активных проводников и обмотка якоря имеет $2a$ параллельных ветвей, то число активных проводников в параллельной ветви будет $\frac{N}{2a}$ и, следовательно, э. д. с. обмотки якоря

$$E = \frac{N}{2a} B_{ср} l_я v.$$

Окружная скорость вращения якоря

$$v = \frac{\pi D_я n}{60},$$

где $D_я$ — диаметр якоря;

$n$ — скорость вращения, *об/мин.*

Так как

$$\pi D_я = 2p\tau,$$

то

$$v = \frac{2p\tau n}{60}$$

и

$$E = \frac{N}{2a} B_{ср} l_я \frac{2p\tau}{60} n.$$

Если принять во внимание, что магнитный поток в воздушном зазоре машины, приходящийся на одно полюсное деление,

$$\Phi = B_{ср} l_я \tau,$$

то

$$E = \frac{p}{60} \frac{N}{a} n\Phi,$$

или

$$E = c_E n\Phi.$$

Здесь $c_E = \frac{p}{60}\frac{N}{a}$ — постоянная величина, зависящая от конструктивных данных машины.

## § 11. ЗАВИСИМОСТЬ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Исходным выражением для расчета электрической машины является выражение электромагнитной мощности

$$P_{эм} = EI_я,$$

где $E$ — э. д. с. обмотки якоря;
$I_я$ — ток якоря.

Подставим значения $E$ и $I_я$ в это уравнение:

$$P_{эм} = \frac{p}{60}\frac{N}{a} n\Phi 2ai_я,$$

где $i_я$ — ток параллельной ветви. Так как магнитный поток

$$\Phi = B_{ср}l_я\tau = B_{ср}l_я\frac{\pi D_я}{2p},$$

то

$$P_{эм} = \frac{\pi}{60} NnB_{ср}l_я D_я i_я,$$

или

$$P_{эм} = \frac{\pi^2}{60}\frac{Ni_я}{\pi D_я} nB_{ср}D_я^2 l_я = \frac{\pi^2}{60} ASnB_{ср}D_я^2 l_я.$$

Здесь $AS = \frac{Ni_я}{\pi D_я}$ — **линейная нагрузка** якоря, под которой понимают число амперпроводников обмотки якоря, приходящееся на 1 *см* длины наружной окружности якоря.

Так как $\pi^2 \approx 10$, то

$$P_{эм} = \frac{1}{6} ASnB_{ср}D_я^2 l_я,$$

откуда

$$D_я^2 l_я = \frac{6P_{эм}}{nASB_{ср}}.$$

Если площадь, ограниченную трапецеидальной кривой $OabO_1$, заменить равновеликим прямоугольником с высотой $B_\delta$ и основанием $b$, равным полюсной дуге машины (см. рис. 33), то

$$B_\delta b = B_{ср}\tau$$

и

$$B_{cp} = \frac{b}{\tau} B_\delta = \alpha B_\delta,$$

где $\alpha$ — коэффициент полюсного перекрытия.

Подставляя значение $B_{cp}$ в полученное выше уравнение, имеем

$$D_я^2 l_я = \frac{6P_{эм}}{nAS\alpha B_\delta}.$$

Так как диаметр якоря $D_я$ и длина сердечника якоря $l_я$ являются основными размерами электрической машины, которые определяют величину всех ее остальных частей, можно считать, что

$$V_{эм} \equiv \frac{P_{эм}}{nAS\alpha B_\delta},$$

т. е. при заданной мощности объем электрической машины изменяется обратно пропорционально скорости вращения, линейной нагрузке, коэффициенту полюсного перекрытия и магнитной индукции в воздушном зазоре.

Бортовые электрические машины с целью снижения габаритных размеров и веса обычно выполняются с высокими скоростями вращения, большими линейными нагрузками и значительными магнитными индукциями в воздушном зазоре. Кроме того, с этой же целью они выполняются с малыми воздушными зазорами. Воздушный зазор $\delta$ у бортовых электрических машин обычно равен 0,2—0,7 *мм*, причем бо́льшие $\delta$, как правило, имеют более мощные электрические машины.

## § 12. МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1. Метод расчета магнитной цепи

Согласно закону Ома для магнитной цепи магнитодвижущая сила (м. д. с.)

$$F = Iw = \Phi R_м = \Phi \frac{L}{\mu S},$$

где $I$ — ток в обмотке;

$w$ — число витков обмотки;

$R_м$ — магнитное сопротивление цепи;

$L$ — длина магнитной цепи;

$S$ — поперечное сечение магнитопровода;

$\mu$ — магнитная проницаемость магнитопровода.

Если в формулу м. д. с. подставить выражение для магнитного потока $\Phi = BS$, то

$$F = \frac{B}{\mu} L = HL,$$

где $B$ — магнитная индукция;

$H$ — напряженность магнитного поля.

Следовательно, чтобы вычислить м. д. с., необходимую для проведения заданного магнитного потока вдоль магнитной цепи, нужно знать величину напряженности магнитного поля и геометрические размеры магнитной цепи.

Напряженность $H$ обычно определяется по кривой намагничивания, представляющей собой зависимость $B = f(H)$, которая имеется для каждой марки стали (рис. 34).

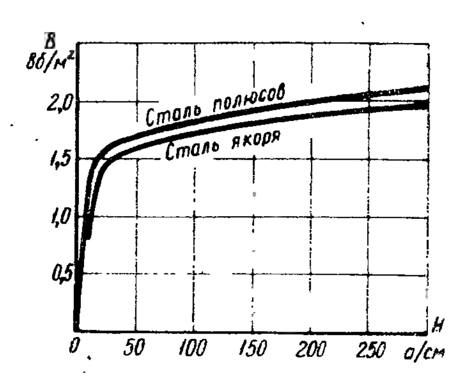



Рис. 34. Кривые намагничивания электротехнических сталей

Порядок определения м. д. с. следующий. По заданному магнитному потоку $\Phi_x$ и данному сечению магнитопровода $S_x$ находят магнитную индукцию $B_x$. Затем по кривой намагничивания определяют напряженность магнитного поля $H_x$. Зная $H_x$ и длину магнитной цепи $L_x$, вычисляют м. д. с. $F_x$.

При расчете магнитной цепи в системе МКСА магнитный поток $\Phi$ выражают в веберах (*вб*), магнитную индукцию $B$ — в веберах на квадратный метр (*вб/м²*), напряженность магнитного поля $H$ — в амперах на метр (*а/м*), м. д. с. $F$ — в амперах (*а*), длину магнитной цепи $L$ — в метрах (*м*), поперечное сечение магнитопровода $S$ — в квадратных метрах (*м²*). Магнитная проницаемость воздуха в этом случае равна $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *гн/м*.

В электрической машине постоянного тока магнитный поток, замыкаясь от одного полюса к другому, проходит через ряд участков, которые отличаются друг от друга не только различными сечениями, но и свойствами материалов (рис. 35). В связи с этим при расчете магнитную цепь электрической машины разбивают на пять участков: воздушный зазор, зубцовый слой якоря, сердечник якоря, главные полюсы и ярмо корпуса и для каждого из них определяют м. д. с. Поскольку электрическая машина имеет симметричную магнитную систему, расчет м. д. с. производят на п а р у  п о л ю с о в.

П о л е з н ы й  м а г н и т н ы й  п о т о к электрической машины определяют из формулы э. д. с.:

$$\Phi = \frac{E}{c_E n} = \frac{60a}{pNn} E.$$

Кроме полезного магнитного потока, в электрической машине существует **магнитный поток рассеяния** $\Phi_p$, который замыкается помимо якоря через воздух (рис. 35). Таким образом, полный магнитный поток, создаваемый полюсами,

$$\Phi_n = \Phi + \Phi_p = \Phi\left(1 + \frac{\Phi_p}{\Phi}\right) = \Phi\sigma,$$

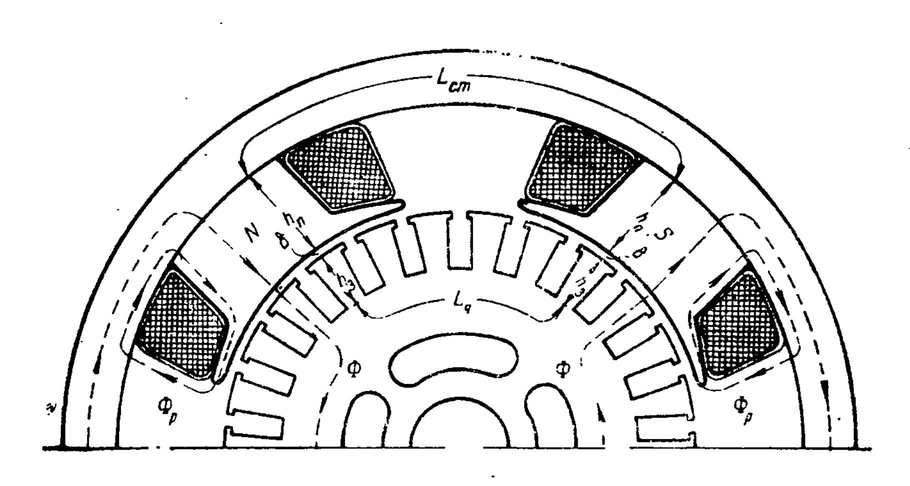



Рис. 35. Эскиз магнитной цепи электрической машины

где $\sigma$ — коэффициент магнитного рассеяния, равный для электрических машин 1,15 — 1,25.

## 2. М. д. с. для проведения магнитного потока через воздушный зазор

Предположим, что якорь имеет гладкую поверхность, тогда м. д. с., необходимая для проведения магнитного потока дважды через воздушный зазор,

$$F_\delta = 2\delta H_\delta = 2\delta \frac{B_\delta}{\mu_0}.$$

Значение магнитной индукции $B_\delta$ в воздушном зазоре машины определяем по формуле

$$B_\delta = \frac{\Phi}{l_я b} = \frac{\Phi}{l_я \alpha \tau},$$

где $l_я$ — длина сердечника якоря;

$b$ — полюсная дуга;

$\tau$ — полюсное деление;

$\alpha$ — коэффициент полюсного перекрытия.

У современных электрических машин $B_\delta$ обычно не выходит из пределов 0,3 — 0,8 *вб/м*².

При зубчатом якоре магнитный поток в воздушном зазоре машины распределяется неравномерно: у зубцов плотность магнитного потока будет больше, а над пазами меньше. В связи с этим средняя длина линии магнитного потока, проходящего через воздушный зазор, будет больше конструктивной длины воздушного зазора $\delta$

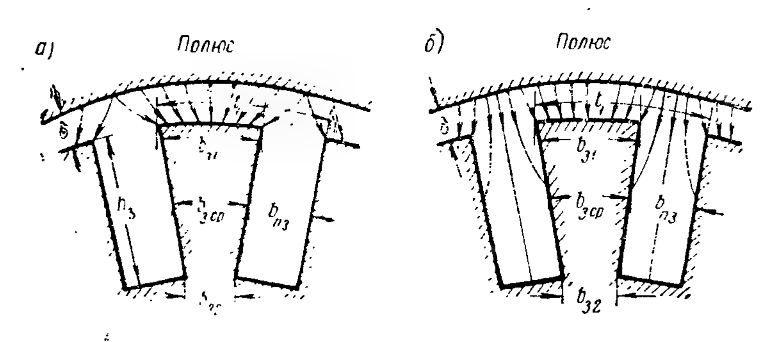



Рис. 36. Магнитное поле в зубцовой зоне:
а) при $B_{з\,макс} < 1{,}8$ *вб/м*²; б) при $B_{з\,макс} \geqslant 1{,}8$ *вб/м*²

(рис. 36). Чтобы учесть это при расчете, действительный воздушный зазор $\delta$ заменяют так называемым расчетным воздушным зазором

$$\delta' = \delta k_\delta ,$$

где $k_\delta$ — коэффициент воздушного зазора, равный 1,15 — 1,25.

Таким образом, окончательное выражение для м. д. с. воздушного зазора имеет вид:

$$F_\delta = 2 \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta k_\delta .$$

### 3. М. д. с. для проведения магнитного потока через зубцовый слой якоря

Магнитный поток входит в якорь частично через зубцы, частично через пазы. Соотношение между этими потоками зависит от соотношения проводимостей зубца и паза.

При малых насыщениях зубца, когда магнитная индукция в зубце не превышает 1,8 *вб/м*², сталь обладает во много раз бо́льшей проводимостью, чем воздух, поэтому можно считать, что весь магнитный поток проходит в якорь только через зубцы (рис. 36, *а*). Поскольку все зубцы якоря на протяжении полюсной дуги находятся в одинаковых магнитных условиях, расчет м. д. с. для про-

ведения потока через зубцовый слой ведут обычно на зубцовый шаг $t_1$.

Магнитный поток, соответствующий зубцовому шагу $t_1$, равен

$$\Phi_t = B_\delta t_1 l_я.$$

Магнитная индукция в верхнем сечении зубца

$$B_{з1} = \frac{\Phi_t}{b_{з1} l_я k_{ся}} = B_\delta \frac{t_1}{b_{з1} k_{ся}},$$

где $b_{з1}$ — ширина вершины зубца;

$k_{ся}$ — коэффициент заполнения сталью сердечника якоря, величина которого зависит от толщины листов и изоляции между листами; обычно $k_{ся} = 0{,}93 \div 0{,}97$.

Магнитные индукции в среднем и нижнем сечениях зубца определяются аналогичным путем:

$$B_{з\,ср} = B_\delta \frac{t_1}{b_{з\,ср} k_{ся}} \quad и \quad B_{з2} = B_\delta \frac{t_1}{b_{з2} k_{ся}}.$$

Здесь $b_{з\,ср}$ и $b_{з2}$ — ширина соответственно в среднем и нижнем сечениях зубца.

После того как магнитные индукции $B_{з1}$, $B_{з\,ср}$ и $B_{з2}$ будут вычислены, по кривым намагничивания стали якоря определяют напряженности магнитного поля в каждом из рассмотренных сечений $H_{з1}$, $H_{з\,ср}$, $H_{з2}$ и затем по формуле

$$H_з = \frac{H_{з1} + 4H_{з\,ср} + H_{з2}}{6}$$

находят среднее расчетное значение напряженности магнитного поля для зубцового слоя.

М. д. с., необходимая для проведения магнитного потока через зубцовый слой якоря, будет равна:

$$F_з = 2h_з H_з,$$

где $h_з$ — высота зубца.

Если магнитная индукция в зубце превышает 1,8 *вб/м*², то вследствие насыщения стали проводимость зубца падает и становится соизмеримой с проводимостью паза. В связи с этим заметная часть магнитного потока, выходящего из полюса, будет проходить в якорь через пазы (рис. 36, *б*).

Чтобы это учесть, вводится зубцовый коэффициент $k_з$, равный отношению поперечного сечения паза $S_{пз}$ к поперечному сечению зубца $S_з$, т. е. $k_з = \frac{S_{пз}}{S_з}$.

Порядок расчета м. д. с. зубцового слоя в этом случае остается тем же, только для определения напряженностей маг-

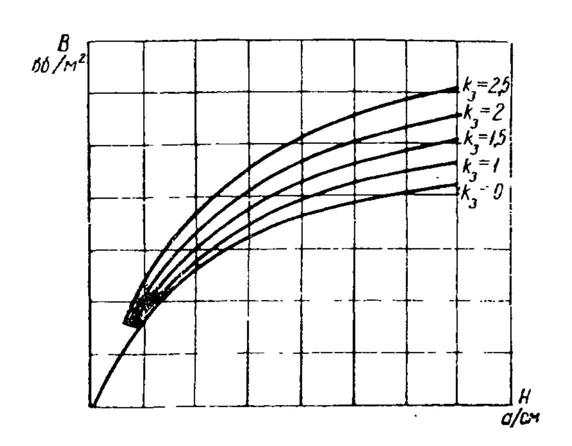



Рис. 37. Кривые намагничивания электротехнической стали с зубцовыми коэффициентами

нитного поля $H_{з1}$, $H_{з\,ср}$ и $H_{з2}$ используются специальные кривые намагничивания, построенные для различных зубцовых коэффициентов (рис. 37).

### 4. М. д. с. для проведения магнитного потока через сердечник якоря, полюсы и ярмо корпуса

Полезный магнитный поток, входящий в сердечник якоря, разветвляется на две части, поэтому магнитная индукция в сердечнике якоря будет равна:

$$B_я = \frac{\Phi}{2S_я},$$

где $S_я$ — сечение сердечника якоря.

По полюсам и ярму корпуса проходит полный магнитный поток, поэтому магнитные индукции в полюсе и ярме определяются формулами

$$B_п = \frac{\Phi_п}{S_п} = \frac{\Phi\sigma}{S_п} \quad \text{и} \quad B_{яр} = \frac{\Phi_п}{2S_{яр}} = \frac{\Phi\sigma}{2S_{яр}},$$

где $S_п$ и $S_{яр}$ — сечения полюса и ярма.

Зная магнитные индукции $B_я$, $B_п$, и $B_{яр}$, по соответствующим кривым намагничивания определяют напряженности магнитных полей $H_я$, $H_п$, $H_{яр}$ и затем вычисляют м. д. с. участков:

$$F_я = L_я H_я, \quad F_п = 2h_п H_п \text{ и } F_{яр} = L_{яр} H_{яр}.$$

Здесь $L_я$ и $L_{яр}$ — длина средней линии потока в сердечнике якоря и ярме, а $h_п$ — высота полюса.

### 5. М. д. с. обмотки возбуждения

М. д. с. на пару полюсов электрической машины

$$F_0 = F_\delta + F_з + F_я + F_п + F_{яр}.$$

М. д. с., которой должна обладать обмотка возбуждения машины, равна:

$$F_в = pF_0,$$

где $p$ — число пар полюсов.

Зная м. д. с. $F_в$ и задаваясь величиной тока возбуждения $I_в$, можно определить число витков обмотки возбуждения:

$$w_в = \frac{F_в}{I_в}.$$

## § 13. КРИВАЯ НАМАГНИЧИВАНИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Если задаться различными значениями э. д. с. $E_0$ в пределах от $E_0 = 0{,}5E$ до $E_0 = 1{,}25E$ и для этих значений определить магнитные потоки Ф и соответствующие им м. д. с. $F_в$, то можно построить зависимость $\Phi = f(F_в)$, которая называется **магнитной характеристикой** или **кривой намагничивания** электрической машины (рис. 38).

При постоянной скорости вращения э. д. с. обмотки якоря $E_0$ пропорциональна магнитному потоку Ф, поэтому в другом масштабе кривая намагничивания представляет собой так называемую **характеристику холостого хода** электрической машины $E_0 = f(I_в)$.

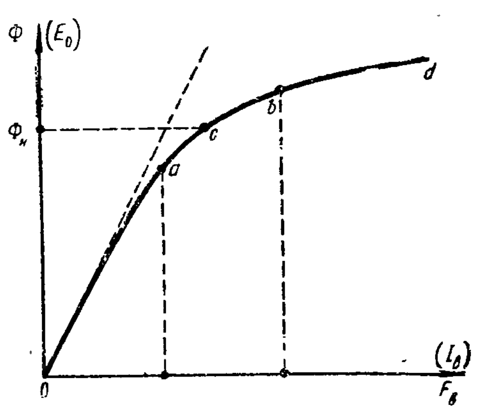



Рис. 38. Кривая намагничивания электрической машины

При небольших токах возбуждения, когда магнитный поток мал и сталь магнитной цепи ненасыщена, проводимость стали во много раз больше проводимости воздуха, поэтому м. д. с. обмотки возбуждения $F_в$ в основном расходуется на проведение магнитного потока через воздушный зазор ($F_в \approx F_\delta$). Так как магнитная проницаемость воздушного зазора постоянна, то магнитный поток изменяется практически пропорционально изменению тока возбуждения (линия $Oa$, рис. 38).

По мере увеличения тока возбуждения сталь машины насыщается и проводимость ее снижается. В результате этого м. д. с.,

необходимая для проведения магнитного потока по ферромагнитным участкам магнитной цепи, возрастает и характеристика $\Phi = f(F_в)$ начинает загибаться вправо. Колено характеристики (участок *ab*, рис. 38) соответствует состоянию среднего магнитного насыщения стали, при котором обычно и работает электрическая машина. При значительном насыщении проводимость стали резко падает и м. д. с., расходуемая на проведение магнитного потока по ферромагнитным участкам магнитной цепи, достигает очень больших значений. Насыщенная часть кривой намагничивания изображается практически прямой линией с небольшим наклоном к оси абсцисс (участок *bd*).

Рабочая точка электрической машины, соответствующая магнитному потоку при номинальном режиме работы $\Phi_н$, обычно находится на колене характеристики. Такое выполнение электрической машины является оптимальным с точки зрения габаритных размеров, веса и использования активных и конструктивных материалов.

При ненасыщенной магнитной системе имеет место повышенный расход активной стали, в связи с чем машина получается громоздкой и тяжелой. При насыщении из-за низкой магнитной проницаемости стали увеличивается расход меди для обмотки возбуждения и других активных и конструктивных материалов.

---

*ГЛАВА III*

# РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ И КОММУТАЦИЯ

## § 14. ПОЛЕ ЯКОРЯ

При холостом ходе в электрической машине постоянного тока существует только магнитное поле вобуждения, создаваемое м. д. с. главных полюсов. За счет этого поля в обмотке якоря при вращении наводится э. д. с. Картина распределения магнитных линий поля возбуждения в двухполюсной электрической машине изображена на рис. 39. Там же указаны направления э. д. с., индуктируемых в активных проводниках, при вращении якоря по часовой стрелке.

Если к зажимам электрической машины приключить внешнюю цепь, то по обмотке якоря пойдет электрический ток, который создаст свое магнитное поле. Направление магнитных линий поля якоря можно определить, пользуясь правилом буравчика.

На рис. 40 показано распределение магнитного поля в якоре электрической машины при щетках, установленных на геометрической нейтрали. Такое магнитное поле можно получить, если при отсутствии поля возбуждения подключить к неподвижному якорю

посторонний источник электрической энергии и пропустить через него ток.

Обмотку якоря можно рассматривать как соленоид. Так как в параллельной ветви обмотки якоря ток $i_я$, а число активных проводников на 1 *см* длины окружности якоря $\frac{N}{\pi D_я}$, то м. д. с. обмотки якоря на пару полюсов будет равна:

$$F_{ря} = i \frac{N}{\pi D_я} \tau = AS\tau,$$

где $AS$ — линейная нагрузка якоря;
$\tau$ — полюсное деление.

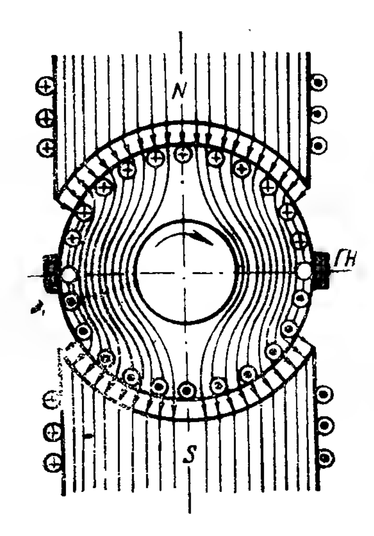



Рис. 39. Магнитное поле главных полюсов

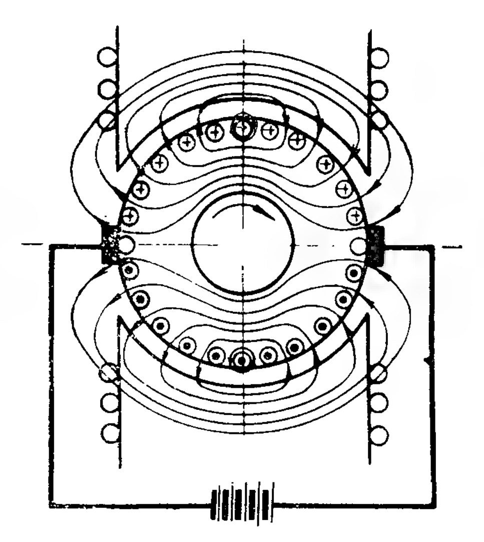


Рис. 40. Магнитное поле якоря

На рис. 41 изображены два полюса электрической машины в развернутом виде. Линией *1* показано изменение м. д. с. якоря $F_{ря}$ в пределах двух полюсных делений.

Магнитная индукция в воздушном зазоре $B_{\delta ря}$ определяется м. д. с. $F_{ря}$ и величиной воздушного зазора, поэтому под полюсами $B_{\delta ря}$ изменяется по тому же закону, что и м. д. с. $F_{ря}$, а между полюсами вследствие резкого увеличения воздушного зазора наблюдается значительное снижение магнитной индукции („провалы“ магнитной индукции, кривая *2*).

Ось магнитного поля якоря совпадает с линией щеток. В воздушном зазоре линии магнитного поля якоря так же, как и линии поля возбуждения, направлены радиально к поверхности якоря. При смещении щеток с геометрической нейтрали электрической ма-

шины ось магнитного поля поворачивается вместе со щетками (рис. 42). Таким образом, несмотря на вращение якоря, магнитное

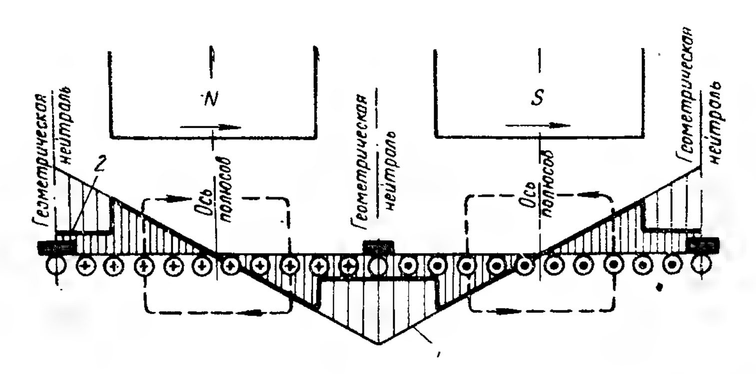



Рис. 41. Распределение м. д. с. и магнитной индукции поля якоря в воздушном зазоре электрической машины

поле его будет неподвижным относительно главных полюсов машины.

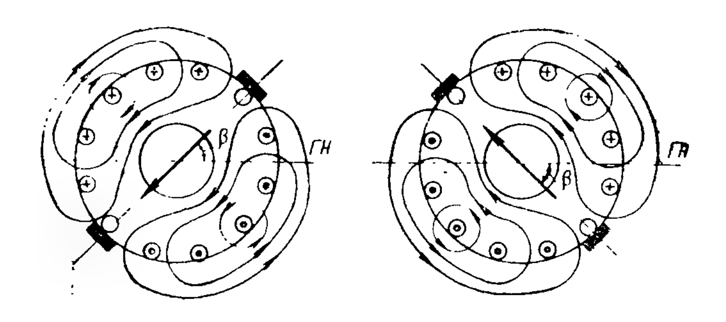



Рис. 42. Изменение направления поля якоря при сдиге щеток

Влияние м. д. с. якоря на магнитное поле главных полюсов называется реакцией якоря.

## § 15. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ ПРИ ЩЕТКАХ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛИ

При нагрузке в результате действия м. д. с. обмотки возбуждения и м. д. с. обмотки якоря в электрической машине постоянного тока создается результирующее магнитное поле. Картину этого поля в случае ненасыщенной магнитной системы можно получить, если совместить магнитное поле якоря с магнитным полем возбуж-

дения. При щетках, установленных на геометрической нейтрали машины, м. д. с. якоря перпендикулярна оси полюсов, поэтому реакция якоря будет поперечной.

Если электрическая машина работает в режиме генератора, то под набегающим краем полюса м. д. с. якоря ослабляет магнитный поток полюса, а под сбегающим краем усиливает его (рис. 43).

В случае ненасыщенной магнитной системы ослабление магнитного поля возбуждения под набегающим краем полюса будет компенсироваться усилением этого поля под сбегающим краем.

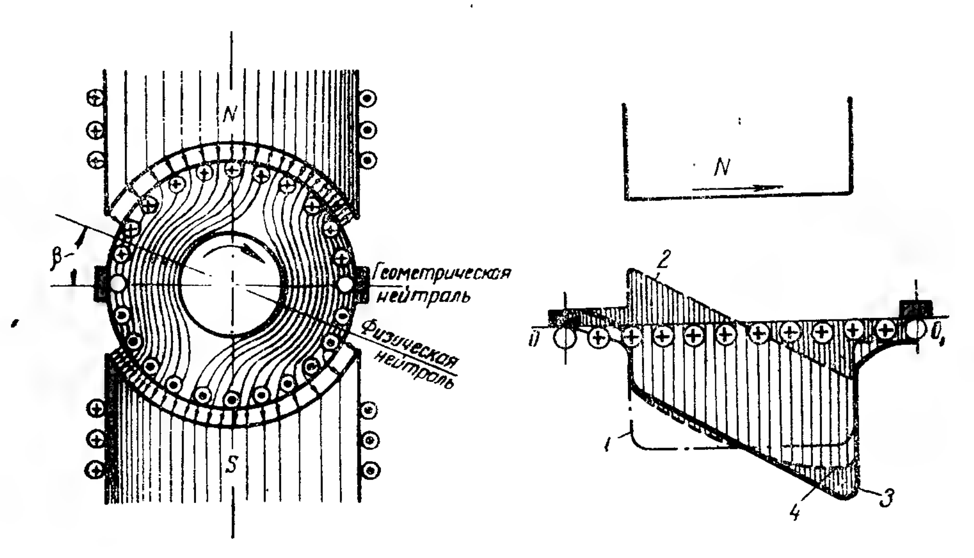



Рис. 43. Результирующее магнитное поле генератора при нагрузке

Рис. 44. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре нагруженного генератора

В связи с этим величина магнитного потока в электрической машине не изменяется, однако магнитное поле в воздушном зазоре машины искажается. На рис. 44 изображена кривая результирующего магнитного поля нагруженного генератора (кривая *3*). Эта кривая получена путем сложения соответствующих ординат кривой поля возбуждения *1* и кривой поля якоря *2*.

В электрических машинах с рабочей точкой на колене кривой намагничивания усиление магнитного поля под сбегающим краем полюса вызывает насыщение стали полюсных наконечников и зубцов якоря. В результате этого магнитное сопротивление на этом участке возрастает и величина результирующего магнитного потока электрической машины снижается по сравнению с потоком при холостом ходе. Характер распределения магнитной индукции в воздушном зазоре машины в этом случае определяется кривой *4*, которая под сбегающим краем полюса располагается ниже кривой *3*. Так как намагничивающий эффект м. д. с. реакции якоря под

сбегающим краем полюса не равноценен размагничивающему эффекту под набегающим краем, площадь, ограниченная кривой *4*, будет меньше площади, ограниченной кривой *1*.

Таким образом, при насыщенной магнитной системе поперечная реакция якоря оказывает не только искажающее, но и размагничивающее действие на магнитное поле полюсов машины.

Физическая нейтраль, под которой понимают прямую линию, проходящую через центр якоря и точки на поверхности якоря с магнитной индукцией, равной нулю, при нагрузке смещается по вращению машины на угол $\beta$. Заметим, что при холостом ходе физическая и геометрическая нейтрали электрической машины совпадают.

Благодаря смещению физической нейтрали в некоторых активных проводниках, входящих в параллельную ветвь, будут наводиться э. д. с. противоположного направления. Это приведет к снижению э. д. с. параллельной ветви и, следовательно, э. д. с. генератора. Кроме того, в результате смещения физической нейтрали щетки, установленные на геометрической нейтрали, будут замыкать накоротко секции, в которых наводятся э. д. с. Последнее может явиться причиной искрения на коллекторе.

Чтобы обеспечить более благоприятные условия для работы щеток и коллектора, щетки целесообразно устанавливать на физической нейтрали электрической машины.

## § 16. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ ПРИ ЩЕТКАХ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЙТРАЛИ

При смещении щеток на физическую нейтраль ось магнитного поля якоря поворачивается на угол $\beta$. В связи с этим об-

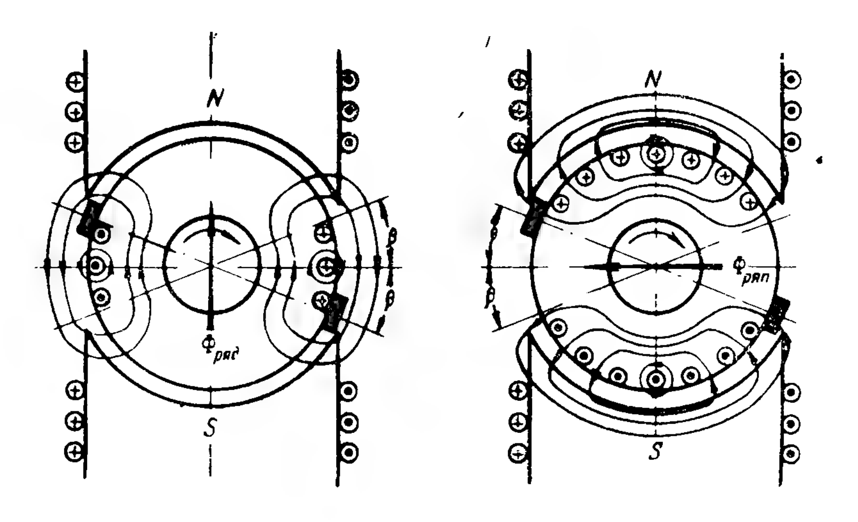



Рис. 45. Продольная и поперечная м. д. с. реакции якоря

мотку якоря можно условно разделить на две части. Одна часть обмотки, заключенная в пределах угла 2β, создает продольную составляющую м. д. с. реакции якоря $F_{ряд}$, которая вызывает магнитный поток $\Phi_{ряд}$ вдоль оси полюсов. Другая же часть обмотки, заключенная в пределах угла 180—2β, создает поперечную составляющую м. д. с. реакции якоря $F_{ряп}$, которая возбуждает магнитный поток $\Phi_{ряп}$ в направлении геометрической нейтрали генератора (рис. 45).

Продольная составляющая поля якоря $\Phi_{ряд}$ ослабляет поток главных полюсов и этим самым снижает э. д. с., наводимую в обмотке якоря. Поперечная составляющая поля якоря $\Phi_{ряп}$ искажает поле возбуждения, а при насыщении магнитной системы машины и ослабляет его.

Если дугу, которая заключена в угле β, обозначить через $b_\beta$, то можно определить составляющие м. д. с. реакции якоря:

$$F_{ряд} = AS \cdot 2b_\beta \quad \text{и} \quad F_{ряп} = AS(\tau - 2b_\beta).$$

Следует заметить, что при смещении щеток против направления вращения продольная составляющая м. д. с. реакции якоря будет подмагничивать машину. Однако, как будет показано ниже, подобное смещение щеток недопустимо ввиду сильного искрообразования на коллекторе генератора.

## § 17. ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ В ГЕНЕРАТОРАХ, ИМЕЮЩИХ ШИРОКИЙ ДИАПАЗОН СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ

Некоторые бортовые генераторы имеют широкий диапазон скоростей вращения. Чтобы обеспечить постоянное напряжение на зажимах бортовой сети, они всегда работают с регуляторами напряжения, которые автоматически изменяют ток возбуждения генераторов при изменении скорости вращения и изменении нагрузки. Так как $E = c_E n\Phi$, то с ростом скорости вращения ток в цепи возбуждения бортового генератора будет автоматически уменьшаться, а при снижении скорости вращения — увеличиваться.

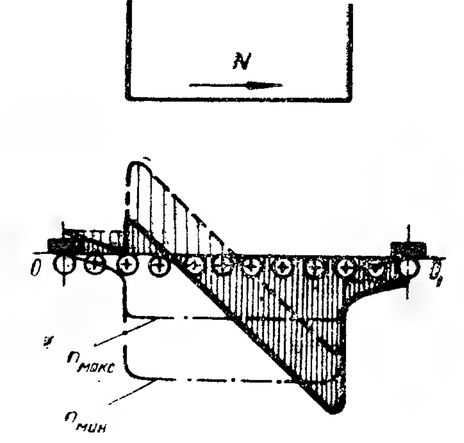



Рис. 46. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре нагруженного генератора с широким диапазоном скоростей вращения

С целью уменьшения габаритных размеров и веса бортовые генераторы выполняются с небольшими воздушными зазорами и высокими линейными нагрузками. Например, у серийных

генераторов постоянного тока типа ГСР воздушный зазор $\delta = 0,5 \div 0,7$ *мм*, а линейная нагрузка $AS = 300 \div 450$ *а/см*.

Благодаря высоким $AS$ и малым $\delta$ в указанных генераторах при больших нагрузках имеет место сильная реакция якоря, которая при высоких скоростях вращения, когда магнитный поток полюсов мал, может не только ослабить поток под набегающим краем полюса до нуля, но и вызвать частичное опрокидывание магнитного поля в воздушном зазоре генератора (рис. 46). Опрокидывание магнитного поля приводит к интенсивному искрообразованию на коллекторе, которое нарушает нормальную работу электрической машины.

## § 18. КОМПЕНСАЦИОННАЯ ОБМОТКА

Компенсационная обмотка служит для компенсации магнитного поля реакции якоря. Она размещается в пазах полюсов и включается последовательно в цепь якоря таким образом, чтобы м. д. с. $F_к$, создаваемая ею, была направлена навстречу м. д. с. якоря $F_{ря}$ (рис. 47). Компенсационная обмотка обеспечивает компенсацию поля якоря только в зоне главных полюсов. Между главными полюсами поле якоря компенсируется за счет м. д. с. дополнительных полюсов (см. § 22).

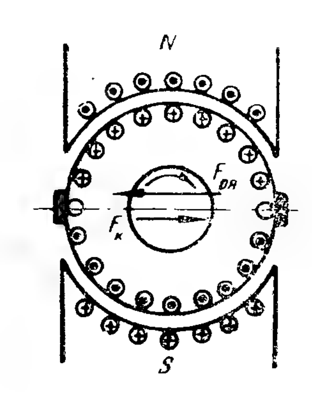


Рис. 47. Компенсационная обмотка

Выполнение компенсационной обмотки связано с усложнением конструкции электрической машины и приводит к увеличению ее габаритных размеров и веса. Поэтому в бортовых электрических машинах компенсационные обмотки выполняются сравнительно редко. Их обычно применяют только в некоторых мощных стартер-генераторах.

## § 19. ПРОЦЕСС КОММУТАЦИИ

При вращении якоря секции его обмотки поочередно переходят из одной параллельной ветви в другую. В момент прохождения нейтрали секции замыкаются щеткой накоротко и ток в них изменяет свое направление.

Процесс изменения тока в секции во время ее перехода из одной параллельной ветви в другую называется **коммутацией**.

Время $T_к$, в течение которого происходит полное изменение тока в секции, называется **периодом коммутации**.

Рассмотрим, как изменяется ток в короткозамкнутой секции в простейшем случае, когда ширина щетки равна ширине коллекторной пластины ($b_щ = b_к$).

Пусть до начала коммутации секция находится в левой параллельной ветви. Одна ее сторона размещается под северным полюсом, другая под южным. Щетка полностью перекрывает коллекторную пластину *1* (рис. 48,*а*). В этом случае через секцию в направлении слева направо будет протекать ток $i_к$, который по величине равен току параллельной ветви. Условно это направление тока в секции принято за положительное, поэтому

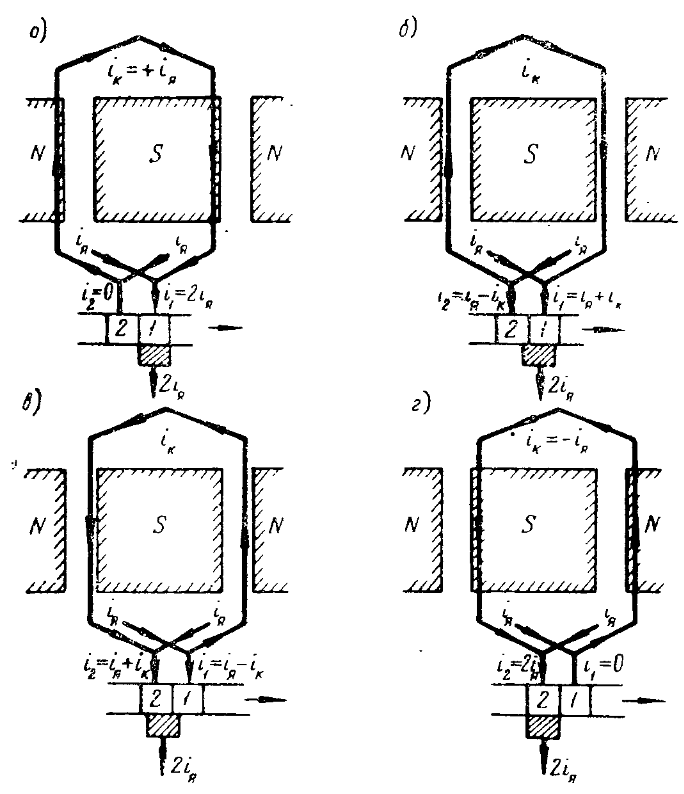



Рис. 48. Коммутация тока в секции

$i_к = +i_я$. Так как слева и справа из параллельных ветвей к щетке подходит ток $i_я$, то от щетки во внешнюю цепь будет поступать ток, равный $2i_я$.

Процесс коммутации начинается тогда, когда щетка входит в соприкосновение со второй коллекторной пластиной (рис. 48, *б*). В этот момент щетка замыкает секцию накоротко и ток в секции начинает изменяться. Сначала он убывает от $+i_я$ до нуля, затем изменяет свое направление (рис. 48, *в*) и начинает возрастать. Процесс изменения тока в секции заканчивается тогда, когда щетка выходит из соприкосновения с коллекторной пластиной *1* и перекрывает полностью коллекторную пластину *2*. В этом случае сек-

ция *1* оказывается в правой параллельной ветви обмотки якоря и через нее в обратном направлении будет протекать ток параллельной ветви (рис. 48, *г*).

Таким образом, при переходе секции из одной параллельной ветви в другую ток в секции $i_к$ изменяется от $+i_я$ до $-i_я$.

## § 20. ПРЯМОЛИНЕЙНАЯ КОММУТАЦИЯ

Коммутация есть сложный физический процесс. Поэтому, приступая к его анализу, сделаем сначала следующие допущения: а) вся контактная поверхность щетки, прилегающая к коллектору, равномерно проводит ток; б) удельное сопротивление щеточного контакта не зависит от плотности тока; в) в коммутирующей секции отсутствуют какие-либо э. д. с.; г) ширина щетки $b_щ$ равна ширине коллекторной пластины $b_к$.

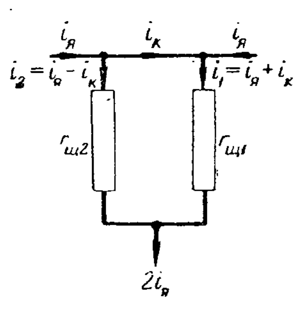


Рис. 49. Эквивалентная схема короткозамкнутого контура

Чтобы установить закон изменения тока в коммутирующей секции, рассмотрим короткозамкнутый контур (рис. 48, *б*), образованный секцией, коллекторными пластинами *1* и *2* и щеткой. В этом контуре переходные сопротивления $r_{щ1}$ и $r_{щ2}$ между щеткой и соответствующими коллекторными пластинами во много раз превышают сопротивление секции $r_c$, поэтому короткозамкнутый контур можно заменить эквивалентной схемой, изображенной на рис. 49.

При обходе короткозамкнутого контура по часовой стрелке согласно второму закону Кирхгофа можно написать:

$$i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} = 0,$$

откуда

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_{щ2}}{r_{щ1}}.$$

Здесь $i_1 = i_я + i_к$ — ток, притекающий к коллекторной пластине *1*;

$i_2 = i_я - i_к$ — ток, притекающий к коллекторной пластине *2*.

Величина контактного сопротивления находится в обратно пропорциональной зависимости от поверхности соприкосновения щетки с коллекторной пластиной, поэтому

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_{щ2}}{r_{щ1}} = \frac{S_{щ1}}{S_{щ2}} = \frac{b_{щ1} l_щ}{b_{щ2} l_щ} = \frac{b_{щ1}}{b_{щ2}},$$

где $S_{щ1}$ и $S_{щ2}$ — поверхности соприкосновения щетки с коллекторными пластинами *1* и *2*;

$b_{щ1}$ и $b_{щ2}$ — ширина соответственно сбегающей и набегающей частей щетки;

$l_щ$ — длина щетки.

Если линейная скорость вращения коллектора $v_к$, а время, в течение которого щетка находится в соприкосновении со второй коллекторной пластиной $t_к$, то

$$b_{щ2} = v_к t_к \quad и \quad b_{щ1} = v_к (T_к - t_к).$$

Следовательно,

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{b_{щ1}}{b_{щ2}} = \frac{v_к (T_к - t_к)}{v_к t_к} = \frac{T_к - t_к}{t_к}$$

или

$$\frac{i_я + i_к}{i_я - i_к} = \frac{T_к - t_к}{t_к}.$$

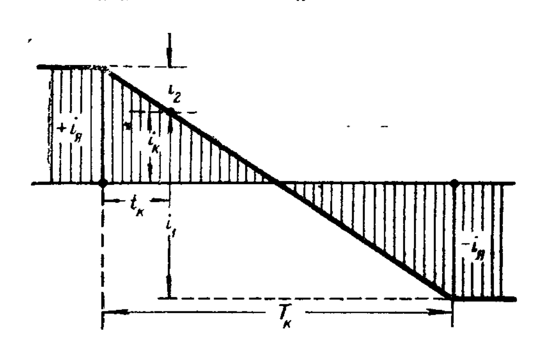


Рис. 50. Прямолинейная коммутация

Решая это уравнение относительно тока в коммутирующей секции, имеем:

$$i_к = i_я \left(1 - \frac{2t_к}{T_к}\right).$$

Из полученного выражения видно, что в рассматриваемом случае ток коммутирующей секции является линейной функцией времени (рис. 50), поэтому такая коммутация называется прямолинейной.

Так как

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{S_{щ1}}{S_{щ2}},$$

то

$$\frac{i_1}{S_{щ1}} = \frac{i_2}{S_{щ2}} = j_{щ1} = j_{щ2} = j_щ = \text{const}.$$

Следовательно, при изменении тока в коммутирующей секции по линейному закону плотность тока под сбегающим $j_{щ1}$ и набегающим $j_{щ2}$ краями щетки остается постоянной в течение всего периода коммутации. Наличие одинаковой плотности тока по всей поверхности щетки обеспечивает безыскровую работу коллектора.

## § 21. КРИВОЛИНЕЙНАЯ КОММУТАЦИЯ

Выше при рассмотрении процесса коммутации предполагалось полное отсутствие в короткозамкнутой секции каких-либо э. д. с. В действительности в коммутирующей секции, когда ток изменяется от $+i_я$ до $-i_я$, наводится э. д. с. самоиндукции $e_L$. Кроме того, в связи с изменением тока в соседней секции, лежащей в том же пазу и замкнутой накоротко щеткой другой полярности (см. рис. 54,*а*), в коммутирующей секции наводится э. д. с. взаимоиндукции $e_M$. Наконец, щетки обычно не располагаются строго по линии физической нейтрали, поэтому за счет внешнего магнитного поля в зоне коммутации в коммутирующей секции наводится коммутирующая э. д. с. $e_к$.

Если считать что ширина щетки $b_щ$, так же как и раньше, равна ширине коллекторной пластины $b_к$, то для короткозамкнутого контура (см. рис. 48,*б*) в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно написать уравнение

$$i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} = e_L + e_M + e_к.$$

Сумму э. д. с. $e_L$ и $e_M$ обычно обозначают $e_R$ и называют р е а к т и в н о й э. д. с., поэтому

$$i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} = e_R + e_к.$$

Так как $i_1 = i_я + i_к$ и $i_2 = i_я - i_к$, то

$$(i_я + i_к) r_{щ1} - (i_я - i_к) r_{щ2} = e_R + e_к$$

и

$$i_я (r_{щ1} - r_{щ2}) + i_к (r_{щ1} + r_{щ2}) = e_R + e_к.$$

Решая это уравнение относительно тока коммутирующей секции, получим

$$i_к = i_я \frac{r_{щ2} - r_{щ1}}{r_{щ1} + r_{щ2}} + \frac{e_R + e_к}{r_{щ1} + r_{щ2}}.$$

Если принять во внимание, что

$$\frac{r_{щ2}}{r_{щ1}} = \frac{b_{щ1}}{b_{щ2}} = \frac{T_к - t_к}{t_к},$$

то можно показать, что первый член правой части полученного уравнения представляет собой ток прямолинейной коммутации, т. е.

$$i_я \frac{r_{щ2} - r_{щ1}}{r_{щ1} + r_{щ2}} = i_я \left(1 - \frac{2t_к}{T_к}\right) = i_л.$$

Следовательно, ток в коммутирующей секции равен:

$$i_к = i_л + i_{кр},$$

где $i_{кр}$ — добавочный ток, обусловленный суммой э. д. с. $e_R$ и $e_к$.

Добавочный ток $i_{кр}$, накладываясь на ток прямолинейной коммутации $i_л$, вызывает его изменение. Такая коммутация называется **криволинейной**.

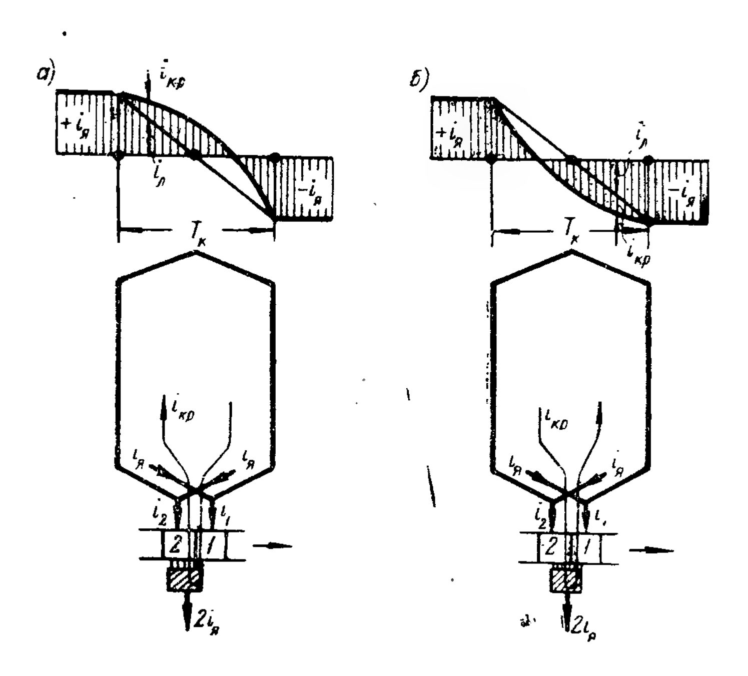



Рис. 51. Криволинейная коммутация:
а) замедленная; б) ускоренная

Величина и направление добавочного тока зависят от величины и направления э. д. с. $e_R$ и $e_к$.

Если $e_R + e_к = 0$, то ток $i_{кр}$ отсутствует и коммутация будет прямолинейной, которая, как известно, характеризуется равномерной плотностью тока под щеткой.

Если $e_R + e_к \neq 0$ и $e_R > e_к$, то коммутация будет криволинейной и **замедленной**. Объясняется это тем, что реактивная э. д. с. $e_R$, стремясь по закону Ленца сохранить в коммутирующей секции прежнее направление тока, вызывает в ней добавочный ток $i_{кр}$, который совпадает по направлению с током $i_1$ и направлен навстречу току $i_2$ (рис. 51,*а*). В результате этого плотность тока под сбегающим краем щетки будет больше, чем под

набегающим, т. е. $j_{щ1} > j_{щ2}$. В момент размыкания короткозамкнутой цепи плотность тока $j_{щ1}$ достигает наибольшего значения, что вызывает искрение под сбегающим краем щетки.

Наличие добавочного тока в короткозамкнутом контуре приводит к затягиванию процесса коммутации. Ток в коммутирующей секции $i_к$ изменяется медленнее, чем при прямолинейной коммутации, и позже проходит через нуль.

Если $e_R + e_к \neq 0$, $e_к > e_R$ и э. д. с. $e_к$ и $e_R$ имеют разные знаки, то добавочный ток $i_{кр}$ будет направлен согласно с током $i_2$ и навстречу току $i_1$ (рис. 51,*б*). В связи с этим процесс изменения тока в коммутирующей секции будет протекать быстрее, чем при прямолинейной коммутации, поэтому такая коммутация называется криволинейной и у с к о р е н н о й. При ускоренной коммутации плотность тока под сбегающим краем щетки всегда меньше, чем под набегающим. Если коммутирующая э. д. с. $e_к$ будет значительно больше реактивной э. д. с. $e_R$, то под набегающим краем щетки может возникнуть искрение.

## § 22. СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ КОММУТАЦИИ

Чтобы обеспечить безыскровую работу щеток в электрической машине, необходимо создать условия, близкие к прямолинейной коммутации. Этого можно достигнуть, если существенным образом уменьшить величину добавочного тока в коммутирующей секции:

$$i_{кр} = \frac{e_R + e_к}{r_{щ1} + r_{щ2}}.$$

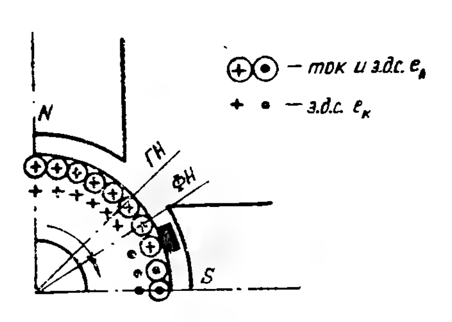



Рис. 52. Смещение щеток за физическую нейтраль для улучшения коммутации генератора

Уменьшить ток $i_{кр}$ можно либо путем увеличения сопротивления короткозамкнутого контура с помощью щеток, имеющих высокое удельное сопротивление, либо путем создания э. д. с. $e_к$ для компенсации реактивной э. д. с. $e_R$. Первый способ снижения тока $i_{кр}$ в современных электрических машинах применяется редко из-за повышенных потерь в щеточном контакте.

Для того чтобы в коммутирующей секции создать э. д. с. $e_к$, в коммутационной зоне электрической машины должно быть создано магнитное поле определенной полярности. Такое магнитное поле можно, например, создать в генераторе, если щетки сместить за физическую нейтраль по направлению вращения якоря. В этом случае коммутирующая секция попадает в зону действия магнитного полюса противоположной полярности и в ней будет наводиться э. д. с. $e_к$, направленная навстречу э. д. с. $e_R$, имеющей, как

известно, такое же направление, как и ток до начала коммутации (рис. 52). Однако этот способ улучшения коммутации не получил широкого применения, так как при изменении нагрузки изменяется положение физической нейтрали и щетки необходимо передвигать.

В современных электрических машинах постоянного тока мощностью от 2 *квт* и выше для улучшения условий коммутации

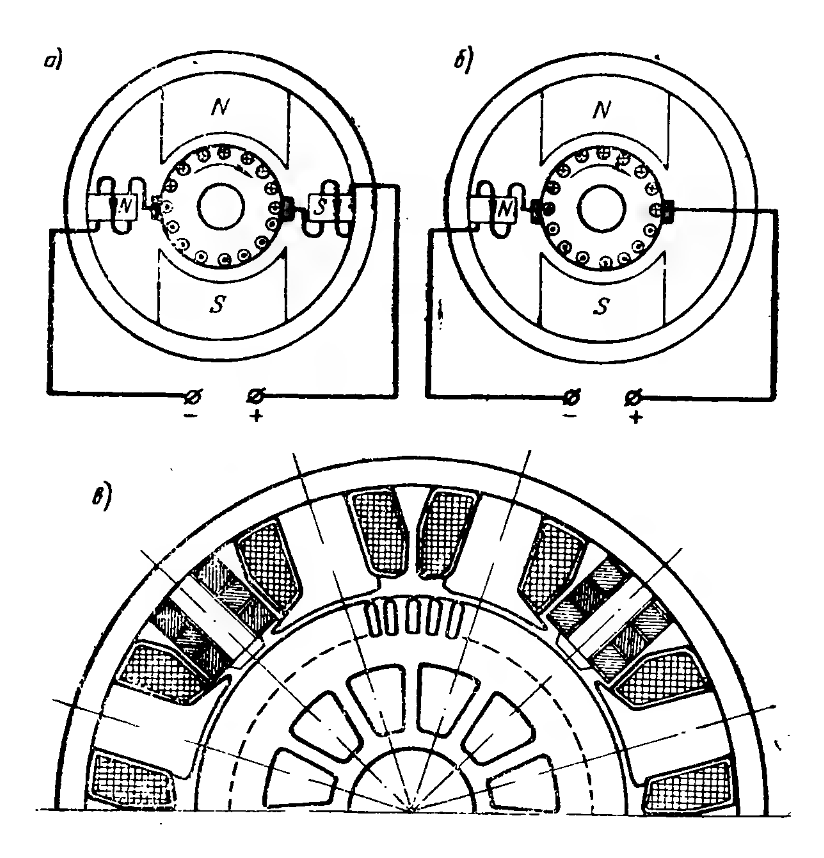



Рис. 53. Дополнительные полюсы:
а) схема генератора с полным числом дополнительных полюсов; б) схема генератора с половинным числом дополнительных полюсов; в) размещение главных и дополнительных полюсов в мощном бортовом генераторе

применяют дополнительные полюсы. Дополнительные полюсы устанавливают между главными полюсами по линии геометрической нейтрали электрической машины (рис. 53, *а*). Чтобы магнитный поток, создаваемый дополнительными полюсами, изменялся пропорционально току якоря, обмотка их включается последовательно в цепь якоря, и сердечники полюсов выполняются сла-

бо насыщенными. Так как магнитное поле, создаваемое дополнительными полюсами, направлено навстречу полю якоря, дополнительные полюсы не только обеспечивают более благоприятные условия коммутации, но и компенсируют поле реакции якоря в зоне коммутации.

Полярность дополнительных полюсов должна быть строго определенной, чтобы э. д. с. $e_к$, наводимая в коммутирующей секции, была бы направлена навстречу реактивной э. д. с. $e_R$. Для выполнения этого условия в генераторах каждый дополнительный полюс

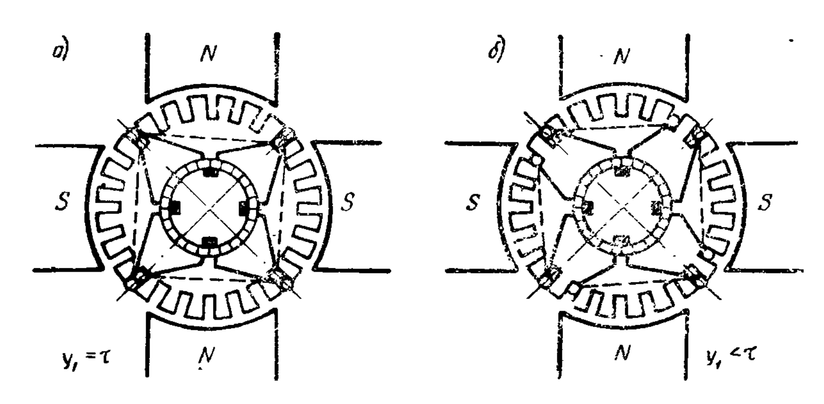



Рис. 54. Коммутация в обмотках:
а) с диаметральным шагом; б) с укороченным шагом

должен иметь такую же полярность, как следующий за ним по вращению главный полюс, т. е.

$$\mathbf{N} \rightarrow S \rightarrow \mathbf{S} \rightarrow N.$$

У двигателей порядок чередования полюсов по вращению должен быть обратный, а именно:

$$\mathbf{N} \rightarrow N \rightarrow \mathbf{S} \rightarrow S.$$

Щетки в электрических машинах с дополнительными полюсами устанавливаются на геометрической нейтрали и положение их не изменяется при изменении нагрузки.

Число дополнительных полюсов в наземных электрических машинах, а также в бортовых электрических машинах мощностью до 6 *квт* обычно равно числу главных полюсов. В бортовых электрических машинах большой мощности с целью снижения их габаритных размеров и веса выполняют половинное число дополнительных полюсов (рис. 53, *б*). Чтобы в этом случае обеспечить более полное использование пространства в корпусе электрической машины, главные полюсы выполняют несимметричной формы, т. е. полюсные сердечники их смещают относительно полюсных нако-

нечников (рис. 53, *в*). При половинном числе дополнительных полюсов э. д. с. $e_к$ наводится только в одной активной стороне коммутирующей секции, поэтому м. д. с. обмотки возбуждения каждого дополнительного полюса должна обеспечивать в воздушном зазоре электрической машины в два раза больший магнитный поток.

Половинное число дополнительных полюсов можно применять при диаметральной обмотке или при обмотке с укороченным шагом, имеющей небольшой коэффициент укорочения. Следует заметить, что небольшое укорочение шага обмотки $y_1$ весьма благоприятно сказывается на коммутации, так как при этом активные стороны коммутирующих секций размещаются в разных пазах (рис. 54), что несколько снижает э. д. с. взаимоиндукции $e_М$ и, следовательно, уменьшает величину реактивной э. д. с. $e_R$. Такой же эффект дает и применение ступенчатой обмотки, изображенной на рис. 22, *б*.

## § 23. СОВРЕМЕННЫЕ ВЗГЛЯДЫ НА КОММУТАЦИЮ

Классическая теория коммутации (§ 20) основана на наличии плотного контакта между щеткой и коллектором. В действительности благодаря «игре» щеток в обойме щеткодержателя дуга щетки всегда несколько больше дуги коллектора. Поэтому плотный механический контакт между щеткой и коллектором будет только в зоне *1* (рис. 55), причем этот контакт не является сплошным, а состоит из целого ряда точечных контактов с очень высокой плотностью тока.

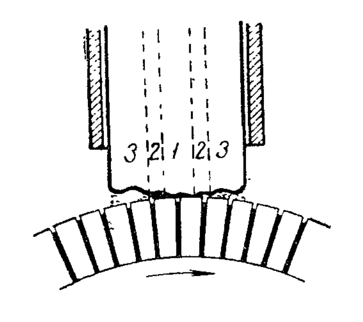


Рис. 55. Щеточный контакт

Вследствие высокой плотности тока места точечного соприкосновения сильно разогреваются, в связи с чем в контактном слое возникает термическая ионизация.

В сравнительно небольшой зоне *2* контакт осуществляется через медную и графитную пыль.

Самой обширной является зона *3*, которая называется **зоной пробоя**. В этой зоне ток проводится путем ионной и электронной эмиссии.

При прохождении тока в контактном слое щеток происходит процесс электролиза, в результате которого на поверхности коллектора образуется тонкая оксидная пленка, представляющая собой соединение меди с кислородом воздуха. Эта пленка увеличивает переходное сопротивление между щеткой и коллектором и предохраняет коллектор от истирания. Сложные ионные процессы, протекающие в контактном слое при прохождении тока, разрушаю-

щим образом действуют на поверхность коллектора и щеток. Особенно сильные разрушения вызывает дуга, которая возникает при появлении зазора между коллектором и щеткой.

Несмотря на то, что ионная теория коммутации дает возможность получить более полное объяснение физической сущности ряда сложных явлений коммутационного процесса, некоторые явления значительно проще и удобнее анализировать, пользуясь основными положениями классической теории коммутации.

## § 24. РАБОТА ЩЕТОК В ВЫСОТНЫХ УСЛОВИЯХ

При полетах на небольших высотах в бортовых электрических машинах успешно применялись и применяются в настоящее время щетки стандартных марок.

При высотах полета 8000—10000 *м* срок службы нормальных щеток резко сокращается. Что же является причиной повышенного износа нормальных щеток на высоте?

Известно, что для коллектора электрической машины постоянного тока, работающей в нормальных атмосферных условиях, характерно наличие блестящей тонкой пленки, которая является пограничным слоем, разделяющим трущиеся поверхности. Эта пленка состоит из слоя окиси меди и слоя графита, который получается при истирании щетки. Пограничный слой обладает способностью поглощать из воздуха водяные пары, а также пары органического и неорганического происхождения, что способствует образованию между трущимися поверхностями тонкого смазывающего слоя. С увеличением высоты количество влаги и кислорода в воздухе уменьшается, в связи с чем пленка с поверхности коллектора исчезает и начинается быстрый износ щеток.

Чтобы щетки могли надежно работать в высотных условиях, необходимо между ними и коллектором создать искусственную пленку, которая обладала бы хорошими смазывающими свойствами независимо от высоты полета.

Одним из способов придания нормальным щеткам высотных свойств является пропитка их в вакууме различными термостойкими смазками.

Широкое применение в бортовых электрических машинах получили специальные высотные щетки типа МГС. Эти щетки прессуются из специальной шихты, состоящей из меди, графита, олова и свинца. В качестве связующего вещества применяется бакелитовый лак. Наличие олова и свинца обеспечивает получение на коллекторе гладкой полированной поверхности, что снижает трение и создает благоприятные условия для коммутации.

## § 25. ПРИЧИНЫ ИСКРЕНИЯ НА КОЛЛЕКТОРЕ

Искрение на коллекторе машины постоянного тока может быть вызвано механическими, потенциальными или коммутационными причинами.

Механические причины обусловлены недостатками в выполнении коллектора и щеточного аппарата. К ним можно отнести смещение коллекторных пластин друг относительно друга, вызванное нагревом и центробежными силами, плохую балансировку якоря, дрожание и вибрацию щеток, эксцентричную установку суппортного кольца относительно коллектора, слабое нажатие на щетку и т. д.

К потенциальным причинам относят повышение напряжения между соседними коллекторными пластинами, вызванное искажением кривой распределения магнитной индукции в воздушном зазоре за счет реакции якоря. При изнашивании коллектора выступающая между пластинами миканитовая изоляция стачивает со щетки мелкие частички графита, которые перекрывают изоляцию и образуют мостики. Под действием напряжения между коллекторными пластинами графитовые мостики раскаляются и создают мелкие искорки, которые при неблагоприятных условиях могут превратиться в дуги. Эти дуги, замыкаясь от одной коллекторной пластины к другой, могут постепенно перерасти в сплошное огненное кольцо, называемое круговым огнем.

К причинам коммутационного порядка относится искрение, связанное с процессом изменения тока в секции в момент, когда она под щеткой переходит из одной параллельной ветви в другую.

В электрических машинах постоянного тока качество коммутации оценивается степенью искрения под щетками (таблица 3).

*Таблица 3*

| Степень искрения | Характеристика степени искрения |
|---|---|
| 1 | Отсутствие искрения (темная коммутация) |
| $1^1/_4$ | Слабое точечное искрение под небольшой частью щетки |
| $1^1/_2$ | Слабое искрение под большей частью щетки |
| 2 | Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузке |
| 3 | Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных вылетающих искр. Допускается в особых случаях |

ГЛАВА IV

# РАБОТА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАТОРА

## § 26. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

По способу питания обмотки возбуждения генераторы постоянного тока делятся на генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением.

В генераторах независимого возбуждения обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника электрической энергии, например аккумуляторной батареи, специального возбу-

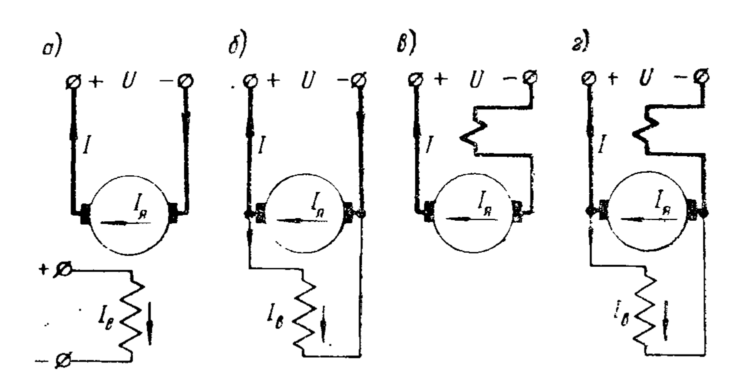



Рис. 56. Принципиальные схемы генераторов постоянного тока

дителя, находящегося на общем валу с генератором, или сети постоянного тока (рис. 56, *а*). К генераторам с независимым возбуждением относятся также и генераторы с постоянными магнитами.

Генераторы с самовозбуждением в зависимости от способа присоединения обмотки возбуждения к обмотке якоря подразделяются на:

а) генераторы параллельного возбуждения (рис. 56, *б*);

б) генераторы последовательного возбуждения (рис. 56, *в*);

в) генераторы смешанного возбуждения, которые имеют две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную (рис. 56, *г*).

## § 27. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ

Основными характеристиками генераторов постоянного тока являются:

а) характеристика холостого хода, представляющая собой зависимость напряжения на зажимах генератора от то-

ка возбуждения при отключенной внешней цепи и постоянной скорости вращения:

$$U_0 = f(I_в) \text{ при } I = 0 \quad \text{и } n = \text{const};$$

б) внешняя характеристика, представляющая собой зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при постоянном сопротивлении цепи возбуждения и неизменной скорости вращения:

$$U = f(I) \text{ при } R_{цв} = \text{const и } n = \text{const};$$

в) регулировочная характеристика, представляющая собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при постоянном номинальном напряжении на зажимах генератора и неизменной скорости вращения:

$$I_в = f(I) \text{ при } U_н = \text{const и } n = \text{const}.$$

Способ возбуждения оказывает существенное влияние на рабочие свойства генератора, поэтому ниже характеристики будут рассмотрены отдельно для каждого типа генератора.

## § 28. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Независимая система возбуждения обычно применяется в тех случаях, когда необходимо иметь генератор с широким диапазоном регулирования напряжения или когда напряжение электрической машины не подходит для питания обмотки возбуждения, что, например, имеет место в электрических машинах очень низкого (4—12 *в*) и высокого (свыше 500 *в*) напряжения.

В генераторах независимого возбуждения ток возбуждения не зависит от напряжения на зажимах генератора и тока нагрузки, а определяется напряжением источника постоянного тока, питающего обмотку возбуждения, и сопротивлением цепи возбуждения. Мощность, расходуемая на возбуждение этих генераторов, в большинстве случаев не превышает 5% от их номинальной мощности.

Схема для снятия характеристик генератора независимого возбуждения представлена на рис. 57. Обмотка возбуждения *ОВ* получает питание от постороннего источника электрической энергии, которым является аккумуляторная батарея. В цепь возбуждения включен регулировочный реостат $r_р$, позволяющий ре-

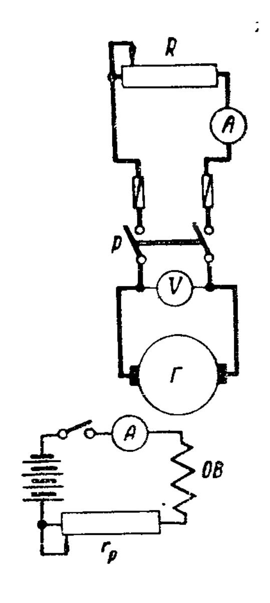



Рис. 57. Схема для испытания генератора независимого возбуждения

гулировать напряжение на зажимах генератора. Нагрузкой для генератора служит нагрузочный реостат *R*, который приключается к зажимам генератора рубильником *P*.

## 1. Характеристика холостого хода

Характеристикой холостого хода генератора называется зависимость

$$U_0 = f(I_в) \quad \text{при} \quad I = 0 \text{ и } n = \text{const}.$$

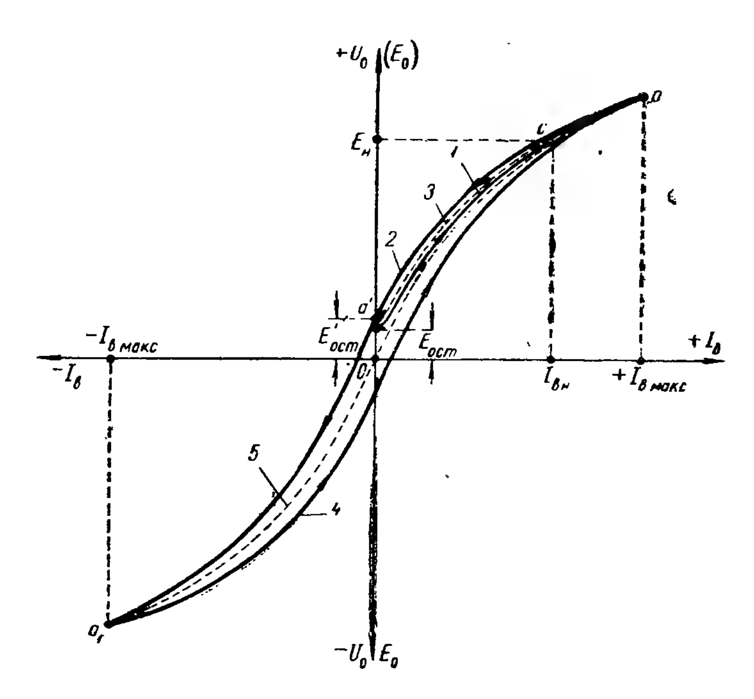



Рис. 58. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

При холостом ходе рубильник *P* выключен, ток в якоре генератора отсутствует, поэтому напряжение на его зажимах $U_0$ равно э. д. с. $E_0$ и характеристикой холостого хода генератора независимого возбуждения можно считать зависимость

$$E_0 = f(I_в) \quad \text{при} \quad I = 0 \text{ и } n = \text{const}.$$

Напомним, что в другом масштабе $E_0 = f(I_в)$ представляет собой магнитную характеристику, или кривую намагничивания генератора $\Phi = f(F_в)$, которая подробно была рассмотрена в § 13.

Магнитная система генератора всегда обладает остаточным магнитным потоком, поэтому при разомкнутой цепи возбуждения

в обмотке якоря наводится э. д. с. остаточного магнетизма $E_{ост}$ (рис. 58). Величина этой э. д. с. обычно не превышает 3% от номинального напряжения генератора.

При увеличении тока возбуждения от $I_в = 0$ до $I_{в\,макс}$ э. д. с. генератора изменяется по кривой *1*, которая называется восходящей ветвью характеристики холостого хода. При плавном уменьшении тока возбуждения от максимального значения до $I_в = 0$ э. д. с. убывает по кривой *2* (нисходящая ветвь характеристики), которая вследствие гистерезиса располагается несколько выше кривой *1*. Если теперь разомкнуть цепь возбуждения, то получим значение остаточной э. д. с. $E'_{ост}$. Однако точка $a'$ является точкой неустойчивого остаточного магнетизма, поэтому сравнительно быстро на зажимах генератора восстанавливается прежнее значение остаточной э. д. с. $E_{ост}$.

За практическую опытную характеристику холостого хода генератора обычно принимают среднюю линию *3*, проведенную между ветвями *1* и *2*.

Рабочая точка генератора, соответствующая э. д. с. при номинальном режиме $E_н$, как уже известно, находится на колене характеристики холостого хода (точка *с*, рис. 58). Такое выполнение генератора является не только оптимальным с точки зрения габаритных размеров и веса, но и дает возможность обеспечить во время работы в достаточной мере устойчивое напряжение на зажимах генератора.

Если ток возбуждения генератора изменять в диапазоне от $+I_{в\,макс}$ до $-I_{в\,макс}$, то можно получить характеристику холостого хода в виде гистерезисной петли, расположенной во всех четырех квадрантах системы координат. Средняя линия *5*, проведенная между кривыми *2* и *4*, называется теоретической или расчетной характеристикой холостого хода. Эта характеристика несколько отличается от практической характеристики холостого хода, особенно в нижней своей части у начала координат; за коленом обе кривые практически совпадают.

## 2. Внешняя характеристика

Внешняя характеристика представляет собой зависимость

$$U = f(I) \text{ при } R_{цв} = \text{const и } n = \text{const}.$$

Так как при снятии этой характеристики напряжение на зажимах цепи возбуждения остается неизменным, условие $R_{цв} = \text{const}$ означает постоянный ток в цепи возбуждения. В связи с этим

$$U = f(I) \text{ при } I_в = \text{const и } n = \text{const}.$$

В режиме холостого хода, когда ток нагрузки $I = 0$, напряжение на зажимах генератора равно э. д. с. $E_0$ (рис. 59).

При увеличении нагрузки усиливается м. д. с. реакции якоря, которая ослабляет поле возбуждения и, следовательно, уменьшает э. д. с. генератора. Чем больше нагрузка, тем сильнее размагничи-

вающее действие м. д. с. якоря и, следовательно, меньше э. д. с. генератора. Зависимость э. д. с. генератора от тока нагрузки $E = f(I)$ называется внутренней характеристикой генератора (кривая $1$, рис. 59).

Напряжение на зажимах генератора

$$U = E - IR_{ця}.$$

Следовательно, если для каждого значения тока нагрузки из э. д. с. вычесть падение напряжения в цепи якоря $IR_{ця}$, которое изменяется пропорционально току нагрузки (прямая $2$), то получим внешнюю характеристику генератора $U = f(I)$ (кривая $3$).

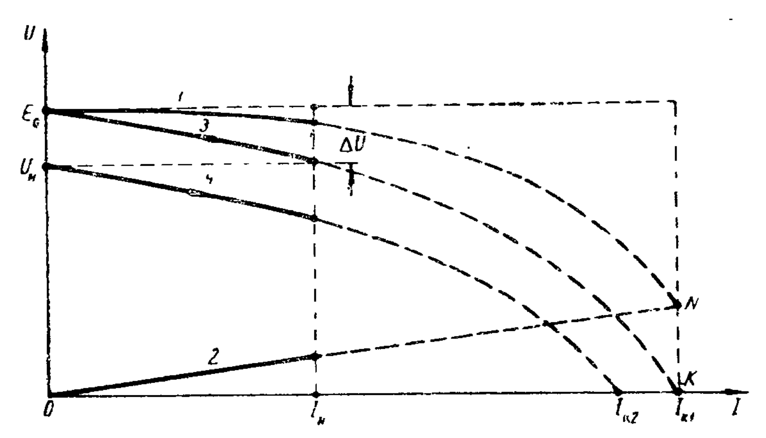



**Рис. 59. Внешние характеристики генератора независимого возбуждения**

При коротком замыкании, когда напряжение на зажимах генератора равно нулю, э. д. с., наводимая в обмотке якоря, уравновешивается падением напряжения в цепи якоря:

$$E = I_{к1} R_{ця} = NK.$$

Короткое замыкание является аварийным режимом для генератора, так как сопротивление цепи якоря мало́ и ток короткого замыкания $I_{к1} = OK$ может достигать значений, опасных для генератора.

На практике рассматривают две внешние характеристики:

а) внешнюю характеристику на повышение напряжения;

б) внешнюю характеристику на понижение напряжения.

При снятии первой внешней характеристики устанавливают такой ток возбуждения $I_{вн}$, чтобы при номинальной нагрузке $I_н$

на зажимах генератора было бы номинальное напряжение $U_н$. Характеристику снимают путем изменения тока нагрузки от $I=I_н$ до $I=0$. В процессе уменьшения тока $I$ напряжение генератора будет возрастать по кривой 3 (рис. 59) до значения $U=E_0$.

Внешняя характеристика на повышение напряжения позволяет определить процентное повышение напряжения на зажимах генератора при изменении тока нагрузки в рабочих пределах:

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_н}{U_н} 100.$$

У генераторов независимого возбуждения $\Delta U$ составляет 5 — 12%, причем меньшие значения $\Delta U$ относятся к генераторам с дополнительными полюсами и насыщенной магнитной системой.

Вторая внешняя характеристика снимается при таком токе возбуждения $I_{в0}$, который при холостом ходе ($I=0$) обеспечивает на зажимах генератора номинальное напряжение $U_н$. Характеристика снимается при увеличении тока нагрузки от $I=0$ до $I=I_н$. По мере увеличения тока $I$ напряжение на зажимах генератора уменьшается по кривой 4 (рис. 59).

Внешняя характеристика на понижение напряжения позволяет судить о характере изменения напряжения генератора при переходе от холостого хода к режиму номинальной нагрузки.

В связи с меньшим током возбуждения ($I_{в0} < I_{вн}$) ток короткого замыкания во втором случае будет меньше, чем в первом, т. е. $I_{к2} < I_{к1}$.

### 3. Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика представляет собой зависимость

$$I_в = f(I) \text{ при } U_н = \text{const и } n = \text{const}.$$

Увеличение нагрузки, как известно, сопровождается снижением напряжения на зажимах генератора. Поэтому для поддержания постоянного напряжения необходимо одновременно с ростом тока нагрузки увеличивать ток возбуждения, чтобы компенсировать размагничивающее действие реакции якоря и омическое падение напряжения в цепи якоря.

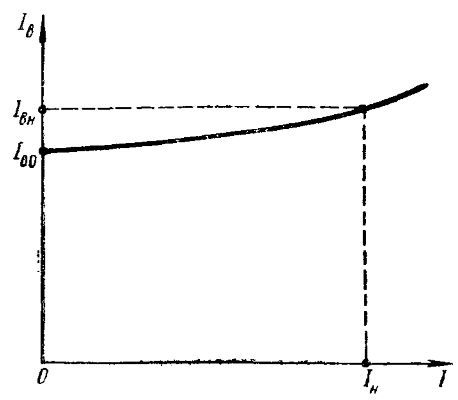



Рис. 60. Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения

При увеличении тока возбуждения возрастает насыщение магнитной системы генератора, поэтому регулировочная характеристика изображается кривой, выпуклость которой обращена в сторону оси абсцисс (рис. 60).

По регулировочной характеристике можно установить пределы регулирования тока возбуждения и определить величину сопротивления регулировочного реостата.

## § 29. ПРОЦЕСС САМОВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Магнитная система генератора, подвергавшегося намагничиванию, всегда обладает небольшим остаточным магнитным потоком. Если генератор параллельного возбуждения привести во вращение с номинальной скоростью, то в обмотке якоря за счет остаточного магнитного потока будет индуктироваться э. д. с. $E_{ост}$. Величина этой э. д. с. обычно составляет 2—3% от номинального напряжения генератора.

Рис. 61. Схема для испытания генератора параллельного возбуждения

Так как обмотка возбуждения приключена параллельно к зажимам генератора (рис. 61), по ней потечет ток $I_в$, который создаст дополнительный магнитный поток. Ток

$$I_в = \frac{E_{ост}}{R_{цв}} = \frac{E_{ост}}{R_в + r_р},$$

где $R_в$ — сопротивление обмотки возбуждения;
$r_р$ — сопротивление регулировочного реостата.

В случае согласного направления обоих магнитных потоков результирующий магнитный поток увеличится и э. д. с., наводимая в обмотке якоря возрастет. Рост э. д. с. якоря вызовет новое увеличение тока в цепи возбуждения, а это, в свою очередь, приведет к дальнейшему повышению результирующего магнитного потока возбуждения, а вместе с ним э. д. с. якоря, тока возбуждения и т. д. Поскольку в этом случае ток возбуждения непрерывно изменяется, в обмотке возбуждения будет наводиться э. д. с. самоиндукции, которая вместе с падением напряжения в цепи возбуждения будет уравновешивать напряжение генератора, т. е.

$$u_0 = i_в R_{цв} + L_в \frac{di_з}{dt}.$$

Здесь $u_0$ — мгновенное значение напряжения на зажимах генератора и, следовательно, на зажимах цепи возбуждения;
$L_в$ — индуктивность цепи возбуждения.

Выясним, до какого напряжения будет возбуждаться генератор, если сопротивление цепи возбуждения $R_{цв} = \text{const}$, внешняя цепь отключена и генератор вращается с постоянной номинальной скоростью $n_н$.

На рис. 62 представлена характеристика холостого хода этого генератора.

При $R_{цв} = \text{const}$ падение напряжения в цепи возбуждения пропорционально току $I_в$, поэтому зависимость $I_в R_{цв} = f(I_в)$ изоб-

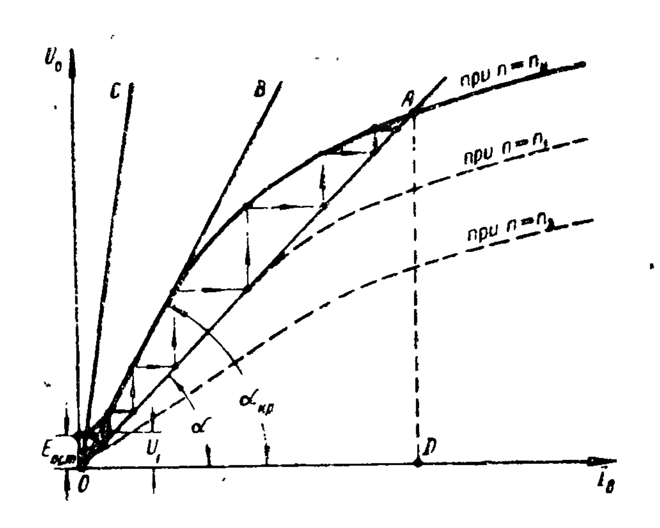



Рис. 62. Самовозбуждение генератора параллельного возбуждения

ражается прямой $OA$, выходящей из начала координат под некоторым углом $\alpha$ к оси абсцисс, причем

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_в R_{цв}}{I_в} = R_{цв}.$$

Линия $OA$ называется линией постоянного сопротивления или вольтамперной характеристикой цепи возбуждения.

Процесс самовозбуждения генератора будет продолжаться, очевидно, до тех пор, пока падение напряжения в цепи возбуждения не будет равно э. д. с., наводимой в обмотке якоря. Величина напряжения, до которого возбуждается генератор, будет определяться точкой пересечения линии постоянного сопротивления с характеристикой холостого хода (точка $A$, рис. 62).

Процесс самовозбуждения генератора происходит по восходящей ветви характеристики холостого хода. Эта ветвь всегда имеет небольшой слегка вогнутый участок у оси ординат, поэтому линия постоянного сопротивления цепи возбуждения при некотором значении $R_{цв} = R_{кр}$ может совпасть с прямолинейной частью харак-

теристики холостого хода (линия $OB$). Это сопротивление называется **критическим**. Угол наклона линии $OB$ к оси абсцисс называется **критическим углом** $\alpha_{кр}$. При критическом сопротивлении процесс самовозбуждения будет неустойчивым. Если сопротивление цепи возбуждения превышает критическое значение (линия $OC$), то самовозбуждение генератора практически становится невозможным ($U_1 \approx E_{ост}$).

Большое влияние на процесс самовозбуждения генератора оказывает изменение его скорости вращения. Если при номинальной скорости вращения генератор возбуждается до напряжения $U = AD$, то при снижении скорости вращения до $n = n_1$ и том же $R_{кв}$ процесс самовозбуждения генератора станет неустойчивым, а при скорости вращения $n = n_2$ генератор практически возбуждаться не будет. Иначе говоря, каждой скорости вращения соответствует свое критическое сопротивление цепи возбуждения.

Таким образом, для самовозбуждения генератора необходимы следующие условия:

а) наличие магнитного потока остаточного магнетизма;

б) правильное включение обмотки возбуждения, обеспечивающее совпадение по направлению потока, создаваемого током возбуждения, с потоком остаточного магнетизма;

в) ограниченное сопротивление цепи возбуждения, которое для данной скорости вращения должно быть меньше критического.

## § 30. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

### 1. Характеристика холостого хода

Генератор параллельного возбуждения, как уже известно, может самовозбуждаться только при одном направлении тока в обмотке возбуждения, поэтому его характеристика холостого хода

$$U_0 = f(I_в) \quad \text{при} \quad I = 0 \text{ и } n = \text{const}$$

всегда располагается в первой четверти системы координатных осей (рис. 63).

При холостом ходе в цепи якоря генератора имеет место падение напряжения $I_в R_{ця}$, вызванное током возбуждения. Так как сопротивление цепи якоря невелико, а номинальный ток возбуждения составляет всего 1—5% от номинального тока нагрузки, это падение напряжения будет ничтожно мало. В связи с этим напряжение на зажимах генератора практически не будет отличаться от э. д. с., наводимой в обмотке якоря, и, следовательно, между характеристиками холостого хода генератора параллельного и независимого возбуждения, если они сняты при изменении тока возбуждения в одних и тех же пределах, по существу не будет разницы.

## 2. Внешняя характеристика:

$$U = f(I) \text{ при } R_{цв} = \text{const и } n = \text{const}.$$

При увеличении нагрузки растет падение напряжения в цепи якоря и усиливается поле реакции якоря. Это приводит к снижению напряжения на зажимах генератора и, следовательно, к уменьшению тока в обмотке возбуждения, так как ток $I_в = \frac{U}{R_{цв}}$. Уменьшение тока возбуждения вызывает дополнительное ослабление магнитного поля в воздушном зазоре электрической машины. В результате этого в рабочем диапазоне нагрузок от $I=0$ до $I=I_н$ внешняя

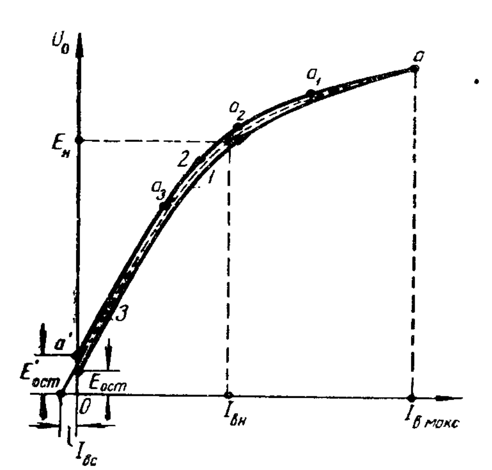



Рис. 63. Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения

Рис. 64. Внешние характеристики генератора параллельного возбуждения

характеристика генератора параллельного возбуждения (кривая 1, рис. 64) имеет более падающий характер, чем внешняя характеристика генератора независимого возбуждения (кривая 3). При нагрузках, превышающих номинальное значение, внешние характеристики этих генераторов существенным образом отличаются друг от друга. Объясняется это следующими причинами.

При насыщенной магнитной системе, когда генератор работает на пологой части характеристики холостого хода (участок $aa_1$, рис. 63), напряжение на его зажимах $U$ изменяется почти исключительно за счет увеличения омического падения напряжения в цепи якоря (участок $cc_1$, рис. 64). Так как в этом случае $U$ убывает медленнее, чем уменьшается сопротивление внешней цепи $R$, ток нагрузки $I = \frac{U}{R}$ растет.

По мере увеличения нагрузки действие указанных выше факторов проявляется все сильнее, магнитная система генератора стано-

вится еще менее насыщенной, в результате этого рабочая точка смещается ближе к колену характеристики холостого хода (точка $a_2$). На зажимах генератора также наблюдается значительное снижение напряжения (точка $c_2$).

При больших нагрузках, когда магнитная система генератора размагничивается настолько (точка $a_3$), что напряжение на его зажимах $U$ убывает примерно пропорционально уменьшению сопротивления внешней цепи $R$, величина тока нагрузки практически не изменяется (критический режим работы — точка $c_3$). В дальнейшем рабочая точка генератора смещается на линейную часть характеристики холостого хода. Поскольку магнитная система генератора при этом не насыщена, уменьшение сопротивления внешней цепи сопровождается настолько резким снижением напряжения на зажимах генератора, что ток во внешней цепи $I$ начинает убывать.

Таким образом, ток нагрузки $I$ увеличивается до тех пор, пока магнитная система генератора насыщена, т. е. пока генератор работает на криволинейной части характеристики холостого хода.

Критический ток $I_{кр}$ у генераторов параллельного возбуждения при нормально насыщенной магнитной системе обычно не превышает $2 — 2{,}5\ I_н$.

При коротком замыкании в цепи якоря генератора будет протекать ток $I_к$, величина которого определяется э. д. с. $E_{ост}$, наводимой в обмотке якоря за счет потока остаточного магнетизма и сопротивлением цепи якоря $R_{ця}$. Установившийся ток короткого замыкания $I_к$ обычно меньше номинального тока нагрузки, поэтому он не опасен для генератора. Однако нужно иметь в виду, что при внезапном коротком замыкании, вследствие самоиндукции обмотки возбуждения, магнитный поток генератора исчезает постепенно, в результате этого мгновенный ток короткого замыкания достигает значительной величины и может повредить электрическую машину.

У генератора параллельного возбуждения, так же как у генератора независимого возбуждения (см. § 28), при изучении эксплуатационных свойств обычно снимают две внешние характеристики: одну на повышение (кривая *1*, рис. 64), а другую на понижение напряжения (кривая *2*).

Процентное повышение напряжения $\Delta U$ у генераторов параллельного возбуждения составляет 10—20%.

### 3. Регулировочная характеристика:

$$I_в = f(I) \quad при \quad U_н = \text{const} \quad и \quad n = \text{const}.$$

При одинаковой нагрузке в якоре генератора параллельного возбуждения всегда будет несколько больший ток, чем в якоре генератора независимого возбуждения. Отсюда некоторое усиление реакции якоря и увеличение омического падения напряжения в цепи якоря. Поэтому теоретически регулировочная характеристика

генератора параллельного возбуждения должна располагаться несколько выше регулировочной характеристики генератора независимого возбуждения. Однако в связи с тем, что ток возбуждения очень мал по сравнению с током нагрузки, регулировочные характеристики обоих генераторов практически совпадают.

## § 31. ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ С ШИРОКИМ ДИАПАЗОНОМ СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ

В настоящее время для питания бортовой сети летательных аппаратов применяются генераторы постоянного тока параллельного возбуждения мощностью от 3000 до 18000 *вт*. Эти генераторы представляют собой малогабаритные электрические машины постоянного тока, рассчитанные на привод от основных двигателей летательных аппаратов, имеющих переменную скорость вращения. Чтобы обеспечить на зажимах бортовой сети постоянное напряжение, бортовые генераторы всегда работают в комплекте с угольными регуляторами напряжения. Регулирование напряжения осуществляется путем автоматического изменения сопротивления угольного столба, включенного последовательно в цепь обмотки возбуждения генератора. В случае увеличения напряжения на зажимах генератора, обусловленного ростом скорости вращения и снижением нагрузки, сопротивление угольного столба автоматически увеличивается и ток в обмотке возбуждения уменьшается. При снижении напряжения, обусловленного уменьшением скорости вращения и увеличением нагрузки, сопротивление угольного столба уменьшается и ток в обмотке возбуждения возрастает.

Бортовые генераторы работают в широком диапазоне скоростей вращения, поэтому, чтобы судить об их свойствах, приходится рассматривать целое семейство характеристик.

На рис. 65 изображены примерные характеристики бортового генератора (без угольного регулятора напряжения) для двух значений скорости вращения $n_{мин}$ и $n_{макс}$.

Как видно из представленных кривых, рабочая точка бортового генератора, соответствующая его э. д. с. при номинальном режиме работы, лежит не на колене характеристики холостого хода, как у наземных генераторов постоянного тока (см. рис. 63), а ближе к прямолинейной части характеристики (рис. 65, *а*). Это означает, что бортовой генератор, особенно при высоких скоростях вращения, работает при малом насыщении магнитной системы. Подобная особенность позволяет обеспечить широкий диапазон регулирования напряжения бортового генератора при изменении тока возбуждения в небольших пределах и создать более благоприятные условия для работы угольного регулятора напряжения, так как при малых токах возбуждения угольный регулятор работает более надежно.

В связи с малым насыщением магнитной системы бортовой генератор имеет сильно падающие внешние характеристики; чем выше скорость вращения генератора и, следовательно, меньше

насыщение магнитной системы, тем в больших пределах изменяется напряжение генератора (рис. 65, *б*). Величина процентного повышения напряжения бортового генератора при скоростях вращения, близких к $n_{макс}$, может достигать 300%.

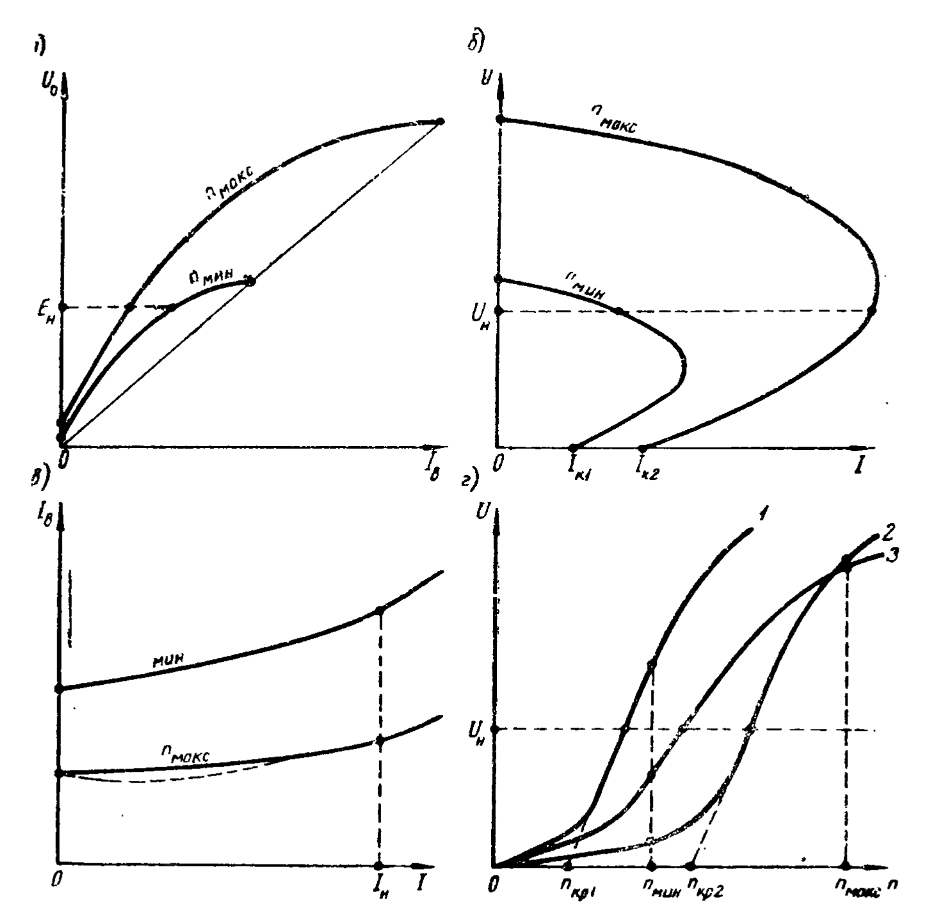



Рис. 65. Характеристики генератора параллельного возбуждения с широким диапазоном скоростей вращения:
а) характеристики холостого хода; б) внешние характеристики; в) регулировочные характеристики; г) скоростные характеристики

Регулировочные характеристики бортового генератора изображены на рис. 65, *в*. Чем выше скорость вращения, при которой снимается регулировочная характеристика, тем ниже на графике проходит кривая $I_в = f(I)$.

У некоторых мощных бортовых генераторов при скоростях вращения, близких к $n_{макс}$, иногда наблюдаются «провалы» в регулировочных характеристиках (пунктирная кривая на рис. 65, *в*). Объясняется это тем, что при ускоренной коммутации, которая в от-

дельных случаях имеет место у бортовых генераторов с дополнительными полюсами при высоких скоростях вращения и небольших нагрузках, токи в коммутирующих секциях создают по продольной оси генератора м. д. с., подмагничивающую главные полюсы генератора.

С помощью регулировочных характеристик можно установить пределы регулирования тока возбуждения, необходимые для расчета параметров автоматического регулятора напряжения.

Особое значение для генераторов с широким диапазоном скоростей вращения имеют скоростные характеристики:

$$U = f(n) \quad \text{при} \quad R_{цв} = \text{const} \quad \text{и} \quad R = \text{const},$$

которые показывают, как изменяется напряжение генератора от скорости вращения при постоянном сопротивлении цепи возбуждения и постоянном сопротивлении нагрузки.

В диапазоне малых скоростей вращения напряжение на зажимах генератора, обусловленное остаточным магнитным потоком, возрастает очень медленно и практически пропорционально скорости вращения (кривая *1*, рис. 65, *г*). После того как скорость вращения превысит некоторое критическое значение $n_{кр1}$, начинает заметно сказываться влияние тока возбуждения, и генератор самовозбуждается. При этом напряжение генератора с ростом скорости вращения резко увеличивается. Величина критической скорости вращения определяется точкой пересечения продолжения прямолинейной части скоростной характеристики с осью абсцисс.

Вид скоростной характеристики зависит от сопротивления цепи возбуждения $R_{цв}$ и сопротивления цепи нагрузки $R$. При увеличении $R_{цв}$ скоростная характеристика генератора смещается вправо (кривая *2*) и величина критической скорости вращения возрастает. Изменение величины $R$ сказывается на крутизне скоростной характеристики. Чем меньше $R$, тем больше ток в якоре генератора, больше омическое падение напряжения в цепи якоря, сильнее размагничивающее действие реакции якоря и, следовательно, положе скоростная характеристика (кривая *3*).

Скоростные характеристики позволяют установить четвертое условие самовозбуждения, которое заключается в том, что при данном сопротивлении цепи возбуждения и данном сопротивлении нагрузки генератор параллельного возбуждения возбуждается только в том случае, если скорость вращения его выше критической.

## § 32. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

При отключенной внешней цепи в обмотке якоря генератора за счет потока остаточного магнетизма индуктируется э. д. с. $E_{ост}$ (рис. 66). При небольших токах нагрузки, когда магнитная система ненасыщена и внутреннее падение напряжения в генераторе мало, напряжение на его зажимах растет практически пропорцио-

нально току нагрузки. По мере того как генератор насыщается, рост напряжения постепенно замедляется, а затем и вовсе прекращается. При очень больших токах нагрузки, обычно превышающих $I_н$, напряжение на зажимах генератора уменьшается. Уменьшение напряжения объясняется сильным насыщением стали магнитной цепи электрической машины, в результате которого при росте тока $I$ магнитный поток и, следовательно, э. д. с. генератора почти не увеличиваются, в то время как размагничивающее действие реакции якоря усиливается и омическое падение напряжения в цепи якоря возрастает.

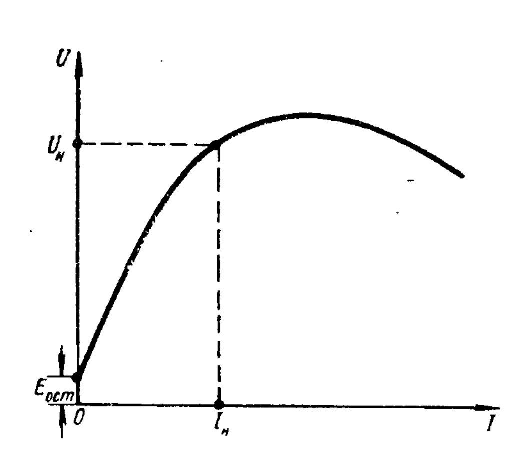



Рис. 66. Внешняя характеристика генератора последовательного возбуждения

Режим короткого замыкания опасен для генератора последовательного возбуждения, так как при коротком замыкании через якорь электрической машины будет протекать ток, во много раз превышающий номинальный ток генератора.

Для питания потребителей электрической энергии, как известно, требуются источники постоянного напряжения, поэтому генераторы последовательного возбуждения, у которых напряжение резко изменяется с изменением тока нагрузки, не имеют практического применения.

## § 33. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В генераторах смешанного возбуждения имеются две обмотки возбуждения — параллельная и последовательная, которые в зависимости от назначения генератора включаются согласно или встречно. При согласном включении м. д. с. обмоток возбуждения складываются, при встречном — вычитаются.

У генераторов с согласно-смешанным возбуждением параллельная обмотка обеспечивает основной магнитный поток, а последовательная служит для компенсации падения напряжения в генераторе при нагрузке. Для того чтобы действие последовательной обмотки возбуждения было наиболее эффективным, магнитная система генератора выполняется слабо насыщенной. Генераторы с согласно-смешанным возбуждением применяются в тех случаях, когда на зажимах генератора необходимо обеспечить постоянное напряжение, особенно при частых колебаниях тока нагрузки.

Встречно-смешанное возбуждение используется для получения у генераторов внешней характеристики с крутым спадом напряжения. Такие внешние характеристики необходимо иметь, например, у сварочных генераторов, для того чтобы при различных значениях сопротивления внешней цепи обеспечить примерно постоянный ток нагрузки.

## 1. Характеристика холостого хода:

$$U_0 = f(I_в) \quad \text{при} \quad I = 0 \quad \text{и} \quad n = \text{const}.$$

При отключенной внешней цепи ток в последовательной обмотке возбуждения отсутствует, поэтому характеристика холостого хода данного генератора ничем не отличается от подобной характеристики генератора параллельного возбуждения.

## 2. Внешняя характеристика:

$$U = f(I) \quad \text{при} \quad R_{цв} = \text{const} \quad \text{и} \quad n = \text{const}.$$

В генераторе согласно-смешанного возбуждения с увеличением нагрузки $I$ магнитный поток, создаваемый последовательной обмоткой возбуждения, возрастает и насыщение магнитной системы генератора усиливается. При малых токах $I$, когда магнитная система генератора насыщена слабо, м. д. с. последовательной обмотки возбуждения превышает м. д. с., необходимую для компенсации падения напряжения в генераторе, поэтому по мере увеличения тока нагрузки $I$ напряжение на его зажимах несколько возрастает. При значительных токах $I$, вследствие насыщения магнитной цепи, последовательная обмотка возбуждения не может обеспечить полную компенсацию падения напряжения в генераторе, поэтому с ростом тока нагрузки $I$ напряжение генератора снижается (кривая *1*, рис. 67,*а*).

Обычно последовательная обмотка возбуждения рассчитывается так, чтобы ее м. д. с. полностью компенсировала размагничивающее действие реакции якоря и омическое падение напряжения в цепи якоря при номинальной нагрузке генератора. Такой генератор смешанного возбуждения считается нормально скомпенсированным.

Если при изменении нагрузки постоянное напряжение желательно иметь на зажимах у потребителей электрической энергии, то обмотку последовательного возбуждения генератора усиливают, т. е. выполняют с повышенным числом витков, чтобы ее м. д. с. была бы достаточной для компенсации падения напряжения не только в цепи якоря генератора, но и в питающей линии. Внешняя характеристика такого перекомпенсированного генератора смешанного возбуждения представлена кривой *2*, рис. 67, *а*.

В генераторе встречно-смешанного возбуждения при увеличении нагрузки м. д. с. последовательной обмотки ослабляет основное магнитное поле возбуждения, в результате этого напряжение на за-

жимах генератора быстро убывает до нуля (кривая 3). Ввиду того, что м. д. с. последовательной обмотки возбуждения оказывает размагничивающее действие на поток остаточного магнетизма, ток ко-

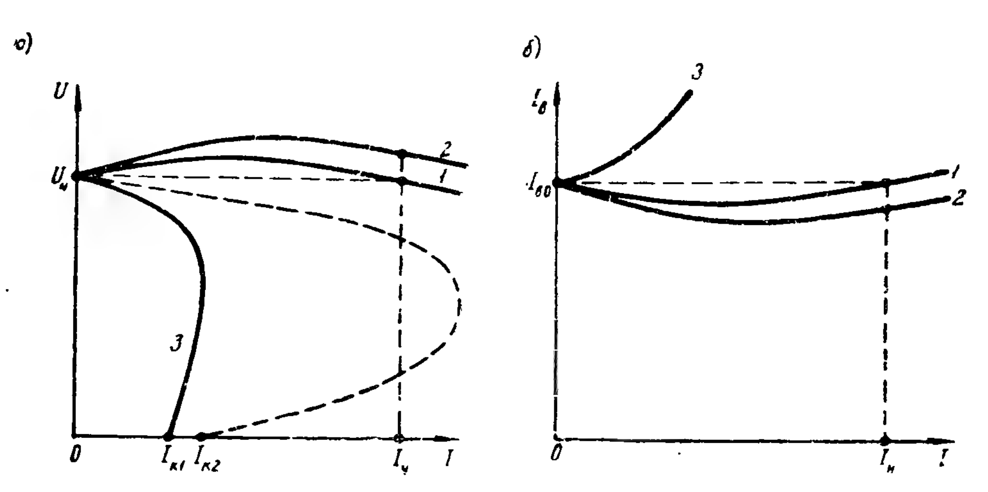



Рис. 67. Внешние и регулировочные характеристики генератора смешанного возбуждения

роткого замыкания генератора при встречно-смешанном возбуждении $I_{к1}$ всегда будет меньше тока короткого замыкания этого генератора при параллельном возбуждении $I_{к2}$.

### 3. Регулировочная характеристика:

$$I_в = f(I) \text{ при } U_н = \text{const и } n = \text{const}.$$

Чтобы при увеличении нагрузки поддержать на зажимах генератора смешанного возбуждения постоянное напряжение, необходимо изменять ток $I_в$ в параллельной обмотке возбуждения по закону кривой 1 (рис. 67,б), которая является зеркальным изображением внешней характеристики нормально скомпенсированного генератора. В случае, если генератор перекомпенсирован, регулировочная характеристика будет изображаться кривой 2, а при встречном включении обмоток — кривой 3.

Так как в генераторе смешанного возбуждения регулирование напряжения осуществляется автоматически за счет последовательной обмотки возбуждения, регулировочная характеристика для этого генератора представляет в основном теоретический интерес и не имеет особого практического значения.

## § 34. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Генераторы постоянного тока для совместной работы соединяются между собой последовательно или параллельно. Последовательное соединение генераторов встречается довольно редко, обычно на тяговых подстанциях электрифицированных железных дорог или в специальных схемах. Параллельное соединение генераторов постоянного тока получило очень широкое применение как в наземных установках, так и на летательных аппаратах.

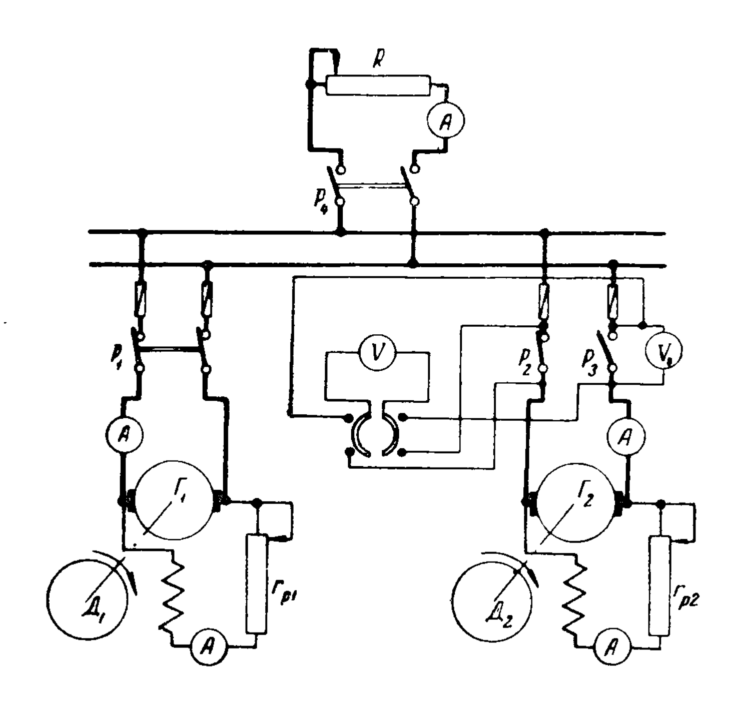



Рис. 68. Схема параллельной работы генераторов параллельного возбуждения

При параллельной работе нескольких генераторов на общую сеть обеспечивается высокая надежность снабжения электрической энергией потребителей летательного аппарата, так как при выходе из строя одного из генераторов всегда имеется необходимый резерв электрической мощности. Кроме того, при параллельной работе эффективнее используются генераторы и, следовательно, вся система электроснабжения аппарата в целом, а также имеется возможность снизить емкость аккумуляторной батареи, которая обычно является резервным источником электрической энергии.

На рис. 68 приведена принципиальная схема параллельного включения двух генераторов постоянного тока параллельного воз-

буждения. Генератор $Г_1$ приключен к шинам и питает нагрузку $R$. Генератор $Г_2$ вводится в работу.

Для того чтобы генераторы можно было включить на параллельную работу, необходимо выполнить два условия:

а) соединить вместе однополярные зажимы генераторов, т. е. плюс приключаемого генератора $Г_2$ соединить с плюсом работающего генератора $Г_1$ и минус приключаемого генератора с минусом работающего;

б) добиться равенства напряжений на зажимах приключаемого и работающего генераторов.

В наземных установках включение генераторов на параллельную работу производится следующим образом. Генератор $Г_2$ приводится во вращение с номинальной скоростью и на его зажимах с помощью регулировочного реостата $r_{р2}$ устанавливается такое же напряжение, как на шинах ($E_{20}=U_1$). После этого включают рубильник $P_2$ и наблюдают за показаниями вольтметра $V_0$, приключенного к зажимам однополюсного рубильника $P_3$. Если генераторы соединены правильно, то стрелка вольтметра установится на нуле, так как сумма э. д. с. в контуре, образованном двумя генераторами, будет равна нулю. В этом случае замыкают рубильник $P_3$ и приключают генератор $Г_2$ к шинам.

При несоблюдении полярности генераторы оказываются включенными последовательно друг с другом, поэтому вольтметр $V_0$ будет показывать сумму напряжений генераторов. Включение рубильника $P_3$ в этих условиях будет означать короткое замыкание обоих генераторов, что может привести к их аварии.

Для параллельно работающих генераторов всегда справедливо условие

$$U_1 = U_2 = U_c.$$

Следовательно, уравнения равновесия э. д. с. для первого и второго генераторов имеют вид:

$$U_c = E_1 - I_{я1} R_{ця1} \quad \text{и} \quad U_c = E_2 - I_{я2} R_{ця2},$$

откуда

$$I_{я1} = \frac{E_1 - U_c}{R_{ця1}} \quad \text{и} \quad I_{я2} = \frac{E_2 - U_c}{R_{ця2}}.$$

В момент включения генератора $Г_2$ на параллельную работу с генератором $Г_1$ его э. д. с. $E_2$ уравновешивает напряжение на шинах $U_c$, поэтому ток $I_{я2}$ равен нулю.

Чтобы генератор $Г_2$ принял на себя часть нагрузки, необходимо или увеличить у него ток возбуждения $I_{в2}$, т. е. увеличить его э. д. с. $E_2$, или уменьшить ток возбуждения $I_{в1}$ у генератора $Г_1$. В первом случае перераспределение нагрузки будет происходить при повышении напряжения на зажимах сети $U_c$, во втором случае — при понижении этого напряжения.

Поскольку изменение напряжения на зажимах сети явление нежелательное, перевод нагрузки с одного генератора на другой

обычно осуществляют путем одновременного воздействия на возбуждение обоих генераторов, а именно: у генератора $Г_2$ возбуждение увеличивают, а у генератора $Г_1$ уменьшают с таким расчетом, чтобы напряжение на шинах оставалось без изменения.

Если необходимо перевести всю нагрузку с генератора $Г_1$ на генератор $Г_2$, то возбуждение обоих генераторов указанным выше образом изменяют до тех пор, пока ток $I_{я1}$ не станет равным нулю. Если во время перевода нагрузки ток возбуждения $I_{в1}$ будет снижен так, что э. д. с. $E_1$ станет меньше $U_c$, то ток якоря разгружаемого генератора изменит свое направление, и электрическая машина, вращаясь в ту же сторону, перейдет в двигательный режим.

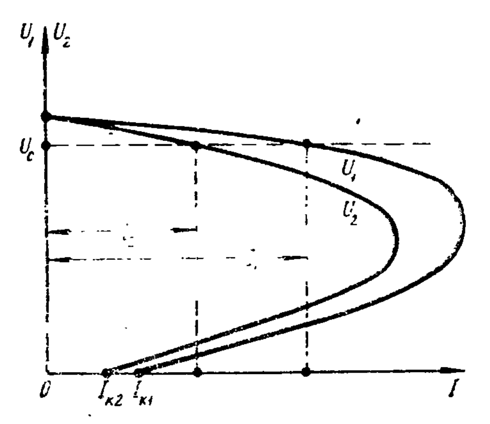



Рис. 69. Распределение нагрузки между параллельно работающими генераторами

Если генераторы включаются на параллельную работу вхолостую и возбуждение у них не регулируется, то нагрузка между ними будет распределяться в зависимости от наклона внешних характеристик. Генератор, обладающий более пологой внешней характеристикой, будет нагружаться больше, а генератор с более падающей внешней характеристикой будет нагружаться меньше (рис. 69).

На летательных аппаратах обычно осуществляется параллельная работа однотипных генераторов равной мощности. Проверка полярности зажимов у них производится при монтаже. Включение генератора на параллельную работу с бортовой сетью осуществляется автоматически с помощью специального реле, которое срабатывает тогда, когда напряжение на зажимах приключаемого генератора примерно на 0,5 *в* превысит напряжение бортовой сети. Благодаря этому после включения в сеть генератор сразу принимает на себя часть нагрузки.

Внешние характеристики однотипных бортовых генераторов равной мощности почти тождественны. Поскольку генераторы приводятся во вращение от различных приводных двигателей, скорости вращения у них изменяются неодинаково. Равномерная нагрузка между параллельно работающими бортовыми генераторами в этих условиях обеспечивается автоматически регуляторами напряжения, для чего последние снабжаются специальными уравнительными обмотками.

## ГЛАВА V

# РАБОТА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ДВИГАТЕЛЯ

## § 35. ПРИНЦИП ОБРАТИМОСТИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Предположим, что генератор параллельного возбуждения работает параллельно с сетью. Направление вращения якоря, а также направление э. д. с. и тока в активных проводниках якоря показано на рис. 70,*а*. В результате взаимодействия тока якоря и магнитного потока полюсов возникает электромагнитная сила $f_{эм}$, которая согласно правилу левой руки создает электромагнитный момент $M$, направленный навстречу моменту приводного двигателя $M_{пр}$.

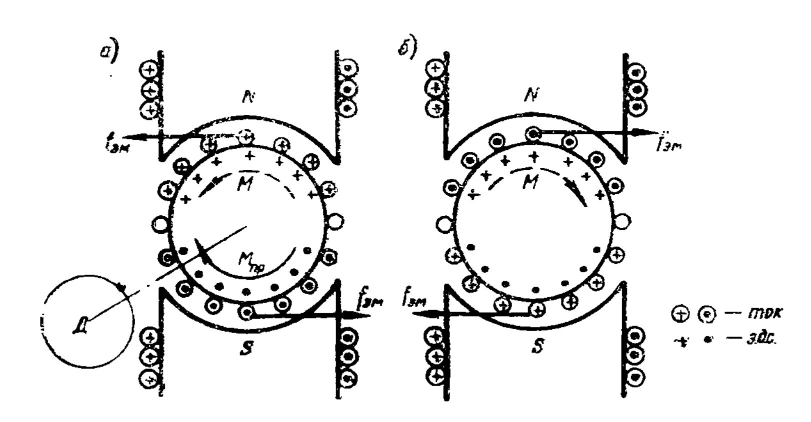



Рис. 70. Обратимость электрической машины постоянного тока: а) режим генератора; б) режим двигателя

При уменьшении тока в цепи возбуждения генератора его э. д. с. будет снижаться и, следовательно, будет уменьшаться ток, отдаваемый генератором во внешнюю сеть. Если в процессе уменьшения тока возбуждения э. д. с. генератора $E$ станет меньше напряжения сети $U_c$, то из сети в якорь электрической машины начнет поступать ток. Этот ток, взаимодействуя с магнитным потоком полюсов, создаст электромагнитный момент $M$ в направлении вращения якоря (рис. 70,*б*). Если теперь от якоря электрической машины отсоединить вал приводного двигателя, то она, вращаясь в прежнем направлении, будет работать в режиме двигателя.

Способность электрической машины работать как генератором, так и двигателем называется о б р а т и м о с т ь ю  э л е к т р и ч е с к о й  м а ш и н ы. Принцип обратимости впервые был сформулирован русским ученым Э. Х. Ленцем в 1833 году.

Так как принцип обратимости справедлив для всех электрических машин независимо от способа их возбуждения, двигатели по-

стоянного тока, так же как и генераторы, подразделяются на двигатели параллельного, последовательного и смешанного возбуждения.

## § 36. УРАВНЕНИЕ РАВНОВЕСИЯ Э. Д. С.

При вращении якоря двигателя в магнитном поле полюсов в его обмотке будет наводиться э. д. с. $E$. По правилу правой руки эта э. д. с. направлена навстречу току якоря (рис. 70,*б*), а следовательно, и приложенному к зажимам электрической машины напряжению. В связи с этим э. д. с. $E$ получила название п р о т и в о-э. д. с. или о б р а т н о й э. д. с.

Уравнение равновесия э. д. с. двигателя имеет вид:

$$U = E + I_я R_{ця},$$

где $U$ — напряжение на зажимах двигателя;

$I_я R_{ця}$ — падение напряжения в цепи якоря.

В сопротивление цепи якоря $R_{ця}$ входит сопротивление обмотки якоря и всех обмоток, соединенных с якорем последовательно, а также сопротивление щеточного контакта.

Падение напряжения в цепи якоря двигателя при номинальной нагрузке обычно не превышает 5—15% от номинального напряжения, поэтому противо-э. д. с. по своей величине близка приложенному напряжению. При холостом ходе, когда ток в якоре двигателя очень мал, можно считать, что $E \approx U$.

## § 37. ТОК ЯКОРЯ И СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

Выражение для тока якоря двигателя получаем из уравнения равновесия э. д. с.:

$$I_я = \frac{U - E}{R_{ця}}.$$

Так как противо-э. д. с.

$$E = c_E n \Phi,$$

то

$$I_я = \frac{U - c_E n \Phi}{R_{ця}}.$$

Напряжение на зажимах двигателя обычно постоянно, поэтому ток в якоре зависит только от величины противо-э. д. с. При увеличении нагрузки на валу скорость вращения двигателя несколько снижается. В результате этого уменьшается величина противо-э. д. с. и, следовательно, увеличивается ток в якоре. При уменьшении нагрузки скорость вращения двигателя несколько повышается, противо-э. д. с. возрастает и ток в якоре уменьшается. Иначе говоря, противо-э. д. с. автоматически регулирует ток в якоре таким образом, что он всегда соответствует нагрузке на валу двигателя.

Формулу скорости вращения двигателя получаем из выражения для противо-э. д. с.

$$n = \frac{E}{c_E\Phi} = \frac{U - I_я R_{ця}}{c_E\Phi}.$$

В большинстве случаев $I_я R_{ця} \ll U$, поэтому в первом приближении можно считать, что

$$n \approx \frac{U}{c_E\Phi},$$

т. е. скорость вращения двигателя пропорциональна напряжению на его зажимах и обратно пропорциональна магнитному потоку.

## § 38. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ ДВИГАТЕЛЯ

Электромагнитная сила, действующая на активный проводник обмотки якоря двигателя, равна:

$$f_{эм} = B_{ср} i_я l.$$

Здесь $B_{ср}$ — среднее значение магнитной индукции в воздушном зазоре машины;
$i_я$ — ток в активном проводнике;
$l$ — активная длина проводника, равная длине сердечника якоря $l_я$.

Если на якоре уложено $N$ активных проводников, то вращающий момент двигателя

$$M = f_{эм} \frac{D_я}{2} N = B_{ср} i_я l_я \frac{D_я}{2} N,$$

где $D_я$ — диаметр якоря.

Как уже известно (см. § 11), ток параллельной ветви $i_я = \frac{I_я}{2a}$ и длина окружности якоря $\pi D_я = 2p\tau$. Следовательно,

$$M = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{a} I_я B_{ср} l_я \tau.$$

Так как магнитный поток полюса

$$\Phi = B_{ср} l_я \tau,$$

то

$$M = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{a} I_я \Phi.$$

или

$$M = c_M I_я \Phi,$$

где $c_M = \frac{p}{2\pi} \frac{N}{a}$.

Таким образом, вращающий момент, развиваемый двигателем постоянного тока, пропорционален току якоря и магнитному потоку полюсов.

В системе МКСА вращающий момент получается в ньютонометрах (*нм*). Чтобы вычислить вращающий момент в *кГм*, правую часть формулы нужно разделить на коэффициент 9,81.

В установившемся режиме работы вращающий момент двигателя $M$ уравновешивается полезным моментом на валу $M_2$ и моментом холостого хода $M_0$, который определяется потерями в стали и механическими потерями двигателя, т. е.

$$M = M_2 + M_0.$$

Это уравнение называется уравнением моментов.

## § 39. ПУСК ДВИГАТЕЛЯ В ХОД

В первый момент после включения в сеть якорь двигателя остается неподвижным, вследствие этого противо-э. д. с. двигателя равна нулю и ток в якоре

$$I_{яп} = \frac{U}{R_{ця}}.$$

Так как сопротивление цепи якоря мало, ток $I_{яп}$ может достигнуть очень большой величины. Чрезмерно большой пусковой ток вызывает сильное искрение на коллекторе, которое разрушающе действует на коллекторные пластины и щетки, а также приводит к снижению напряжения на зажимах сети, что неблагоприятно сказывается на работе других потребителей электрической энергии. В связи с этим пуск наземных электрических двигателей постоянного тока мощностью свыше 1 *квт*, сопротивление $R_{ця}$ кото рых относительно мало, обычно производится с помощью пусковых реостатов со ступенчатым изменением сопротивления. Величина пускового тока в этом случае будет равна

$$I_{яп} = \frac{U}{R_{ця} + R_п},$$

где $R_п$ — сопротивление пускового реостата.

Сопротивление пусковых реостатов обычно выбирают с таким расчетом, чтобы пусковой ток не превышал 1,5—2 $I_{ян}$.

Для пуска в ход двигателей параллельного возбуждения применяют специальные трехзажимные пусковые реостаты.

Трехзажимный пусковой реостат состоит из нескольких секций сопротивлений и медной дуги, к которой посредством зажима *Ш* присоединяется один из концов цепи возбуждения двигателя (рис. 71, *а*). Чтобы предотвратить опасные для изоляции обмотки возбуждения перенапряжения, которые обычно возникают в мо-

мент отключения двигателя от сети, между сопротивлением пускового реостата и медной дугой сделана перемычка, благодаря которой при выключении рубильника $P$ обмотка возбуждения остается замкнутой на якорь двигателя.

При включении рубильника $P$ и переводе ручки пускового реостата $R_п$ на первый рабочий контакт к двигателю подается напряжение сети и якорь его начинает вращаться. Чем выше скорость вращения, тем больше противо-э. д. с. и, следовательно, меньше ток в якоре. Поэтому по мере увеличения скорости вращения двигателя сопротивление пускового реостата нужно плавно выводить.

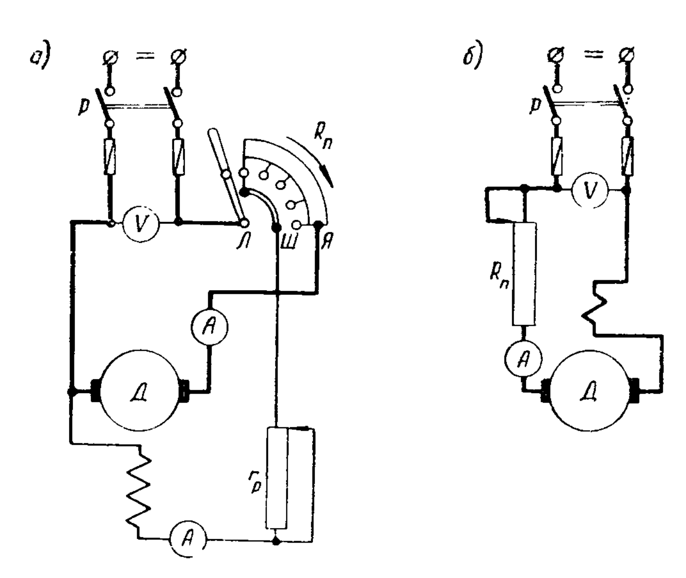



Рис. 71. Схемы включения в сеть:
а) двигателя параллельного возбуждения; б) двигателя последовательного возбуждения

Чтобы при пуске вращающий момент двигателя был бы максимальным, сопротивление регулировочного реостата $r_р$ в цепи возбуждения двигателя должно быть полностью выведено. Если бы обмотка возбуждения была присоединена непосредственно к зажимам якоря, то в момент пуска двигателя вследствие большого падения напряжения в пусковом реостате (до 80% $U_н$) напряжение на обмотке возбуждения было бы мало и магнитный поток двигателя мог бы оказаться недостаточным для создания необходимого пускового момента.

Пуск в ход наземных двигателей последовательного возбуждения осуществляется посредством двухзажимных пусковых реостатов (рис. 71,*б*).

Бортовые электродвигатели имеют сравнительно небольшую мощность и обладают повышенным сопротивлением цепи якоря,

поэтому пуск их в подавляющем большинстве случаев осуществляется без каких-либо пусковых приспособлений, т. е. путем непосредственного включения в бортовую сеть. Пусковые токи при этом обычно не превышают $2—3 I_{ян}$.

Пусковые свойства двигателей постоянного тока определяются пусковым током, пусковым моментом, временем пуска, экономичностью пускового процесса, а также зависимостью пускового момента от напряжения на зажимах двигателя. Последняя характеристика имеет особое значение для бортовых электрических двигателей, поскольку они, как правило, рассчитаны на прямое включение в бортовую сеть летательного аппарата.

В зависимости от способа возбуждения двигатели постоянного тока обладают различными пусковыми свойствами.

У двигателя последовательного возбуждения обмотка возбуждения включается последовательно с якорем, поэтому при прочих равных условиях у него по сравнению с двигателем параллельного возбуждения будет меньше пусковой ток. Пусковой момент будет ниже у двигателя параллельного возбуждения, так как при пуске вследствие сильной реакции якоря у него ослабляется магнитное поле полюсов, в то время как у двигателя последовательного возбуждения это поле усиливается. В связи с насыщенной магнитной системой пусковой момент двигателя последовательного возбуждения менее чувствителен к колебаниям напряжения бортовой сети, чем пусковой момент двигателя параллельного возбуждения. Таким образом, двигатель последовательного возбуждения по сравнению с другими типами двигателей постоянного тока обладает более высокими пусковыми характеристиками.

Для улучшения пусковых свойств двигатель параллельного возбуждения иногда снабжается дополнительной последовательной обмоткой возбуждения. Эта обмотка, являясь добавочным сопротивлением в цепи якоря, несколько снижает пусковой ток двигателя и в то же время повышает его пусковой момент. После того как пуск двигателя заканчивается, последовательная обмотка обычно автоматически закорачивается контактами специального реле, и двигатель продолжает работу при наличии одной параллельной обмотки возбуждения.

## § 40. ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ И КОММУТАЦИИ В ДВИГАТЕЛЕ

Известно, что в генераторе вследствие реакции якоря магнитный поток ослабляется под набегающим краем полюса и усиливается под сбегающим краем. В результате этого физическая нейтраль машины поворачивается по вращению якоря (см. § 15).

При одном и том же направлении тока в якоре и магнитного потока в воздушном зазоре генератор и двигатель имеют противоположное направление вращения. В связи с этим в отличие от генератора м. д. с. реакции якоря усиливает магнитное поле двигателя под набегающим краем полюса и ослабляет его под сбегающим

краем, а физическая нейтраль поворачивается против направления вращения якоря (рис. 72). Следовательно, для создания более благоприятных условий коммутации щетки в двигателе нужно также смещать в сторону, противоположную вращению якоря. Если в дви-

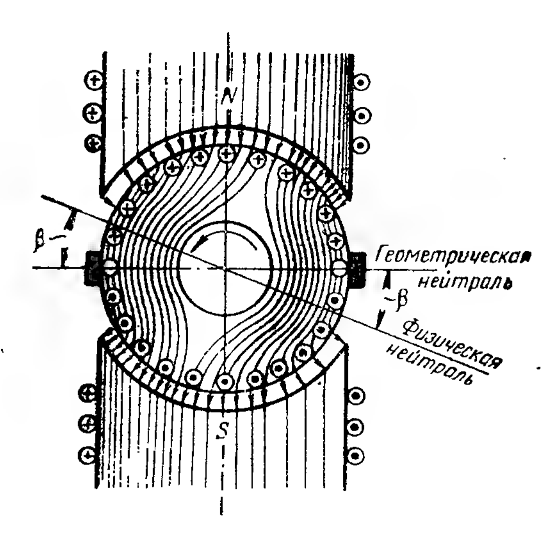



Рис. 72. Реакция якоря в двигателе

гателе установлены дополнительные полюсы, то полярность их должна быть обратной по сравнению с полярностью, которую имеют эти полюсы в генераторе (см. § 22).

## § 41. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рабочими характеристиками двигателя постоянного тока называют зависимость скорости вращения $n$, вращающего момента $M$ и коэффициента полезного действия $\eta$ от тока якоря $I_я$ или зависимость этих же величин от полезной мощности на валу $P_2$ при постоянном напряжении на зажимах двигателя и нерегулируемом токе возбуждения, т. е.

$$n,\ M,\ \eta = f(I_я) \quad \text{при} \quad U = \text{const}$$

или

$$n,\ M,\ \eta = f(P_2) \quad \text{при} \quad U = \text{const}.$$

В обоих случаях первая характеристика называется скоростной, а вторая моментной.

Зависимость скорости вращения от вращающего момента

$$n = f(M) \quad \text{при} \quad U = \text{const}$$

называют механической характеристикой двигателя.

Эксплуатационные свойства двигателей постоянного тока в значительной степени зависят от системы возбуждения, поэтому скоростная, моментная и механическая характеристики обычно рассматриваются применительно к каждому способу возбуждения. Исключение составляет характеристика коэффициента полезного действия, которая имеет общую закономерность для всех электрических машин постоянного тока независимо от способа возбуждения. В связи с этим данная характеристика рассматривается в следующей главе при анализе потерь электрической машины постоянного тока.

## § 42. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В двигателе параллельного возбуждения обмотка возбуждения присоединена параллельно сети, поэтому ток, потребляемый двигателем из сети,

$$I = I_я + I_в.$$

Ток возбуждения двигателя определяется напряжением сети и сопротивлением цепи возбуждения:

$$I_в = \frac{U}{R_{цв}}.$$

Так как рабочие характеристики снимаются при $U = \text{const}$ и $R_{цв} = \text{const}$, ток в цепи возбуждения двигателя также будет постоянным.

Величина тока $I_в$ у двигателей параллельного возбуждения обычно не превышает 4 — 5% от номинального тока двигателя.

### 1. Скоростная характеристика:

$$n = f(I_я) \quad \text{при} \quad U = \text{const} \quad \text{и} \quad I_в = \text{const}.$$

Как уже известно, скорость вращения двигателя постоянного тока

$$n = \frac{U - I_я R_{ця}}{c_E \Phi}.$$

Если в первом приближении принять $\Phi = \text{const}$, то с увеличением нагрузки на валу и, следовательно, с ростом тока в якоре падение напряжения в цепи якоря будет увеличиваться и скорость вращения двигателя будет убывать по прямолинейному закону (прямая *1*, рис. 73,*а*). Однако в действительности в результате размагничивающего действия реакции якоря магнитный поток Ф будет несколько ослабляться и поэтому скоростная характеристика будет иметь вид кривой *2*.

При холостом ходе ток в якоре двигателя равен $I_{я0}$, в связи с этим скоростная характеристика располагается несколько правее оси ординат.

Номинальное изменение скорости вращения двигателя параллельного возбуждения

$$\Delta n = \frac{n_0 - n_н}{n_н} 100$$

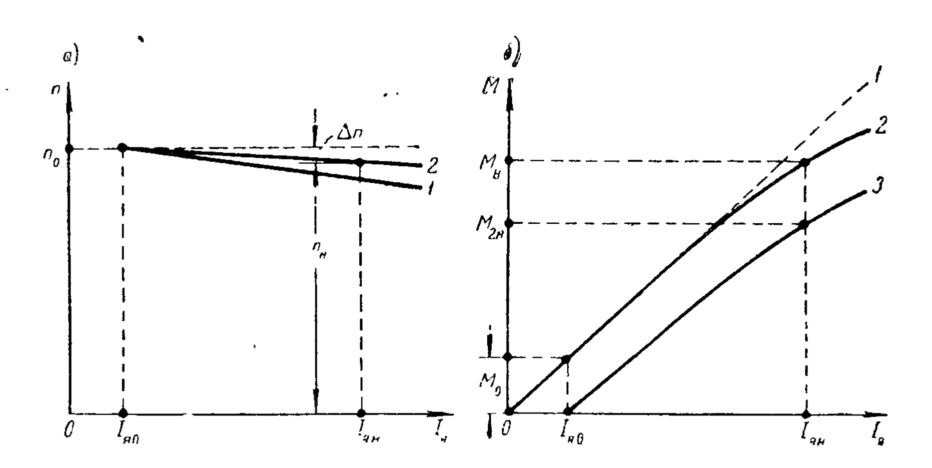



Рис. 73. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения:
а) скоростная характеристика; б) моментная характеристика

составляет примерно 2—8%. Здесь $n_0$ и $n_н$ — скорости вращения двигателя при холостом ходе и номинальной нагрузке на валу.

Так как скорость вращения двигателей параллельного возбуждения мало зависит от нагрузки на валу его скоростная характеристика называется «жесткой».

### 2. Моментная характеристика:

$$M = f(I_я) \quad \text{при} \quad U = \text{const} \quad \text{и} \quad I_в = \text{const}.$$

Вращающий момент двигателя равен:

$$M = c_M I_я \Phi.$$

Если не учитывать размагничивающее действие реакции якоря, то $\Phi = \text{const}$, вращающий момент

$$M = c'_M I_я$$

и, следовательно, моментная характеристика двигателя будет изображаться прямой линией, выходящей из начала координат (пря-

мая *1*, рис. 73,*б*). Однако это справедливо только при очень небольших токах в якоре. В действительности при нагрузке м. д. с. якоря вызывает уменьшение магнитного потока возбуждения, поэтому реальная моментная характеристика двигателя будет несколько отклоняться от прямой *1* в сторону оси абсцисс (кривая *2*).

В установившемся режиме работы вращающий момент двигателя

$$M = M_2 + M_0,$$

откуда

$$M_2 = M - M_0.$$

Так как момент холостого хода $M_0$ определяется суммой потерь в стали и потерь механических, которые практически не зависят от нагрузки на валу, то характеристика полезного момента $M_2 = f(I_я)$ будет располагаться ниже кривой $M = f(I_я)$ на величину $M_0$ (кривая *3*).

### 3. Механическая характеристика:

$$n = f(M) \quad \text{при} \quad U = \text{const} \quad \text{и} \quad I_в = \text{const}.$$

Чтобы установить аналитическое выражение для механической характеристики двигателя параллельного возбуждения, подставим в уравнение скорости вращения значение тока якоря, полученное из формулы вращающего момента:

$$n = \frac{U - I_я R_{ця}}{c_E \Phi} = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{\frac{M}{c_M \Phi} R_{ця}}{c_E \Phi} = \frac{U}{c_E \Phi} - M \frac{R_{ця}}{c_E c_M \Phi^2}.$$

Если пренебречь размагничивающим действием реакции якоря и считать $\Phi = \text{const}$, то

$$n = n_0 - cM,$$

где $n_0 = \frac{U}{c_E \Phi}$ — скорость вращения двигателя при идеальном холостом ходе, т. е. при отсутствии в нем потерь холостого хода;

$c = \frac{R_{ця}}{c_E c_M \Phi^2}$ — постоянный коэффициент.

Таким образом, механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения представляет собой прямую линию, проходящую под небольшим углом к оси абсцисс (прямая *1*, рис. 74). Точка пересечения этой характеристики с осью абсцисс определяет величину пускового момента двигателя.

При введении в цепь якоря двигателя добавочного сопротивления $R_р$ величина коэффициента $c$ увеличивается и, следовательно,

увеличивается наклон механической характеристики к оси абсцисс (прямая *2*).

Механическая характеристика, полученная при отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря ($R_p = 0$) и номинальных значениях напряжения и магнитного потока возбуждения, называется естественной (прямая *1*). Механические характеристики, полученные при наличии добавочного сопротивления в цепи якоря, а также при напряжениях и потоках возбуждения, отличных от номинальных значений, называются искусственными (прямые *2*, *3* и *4*).

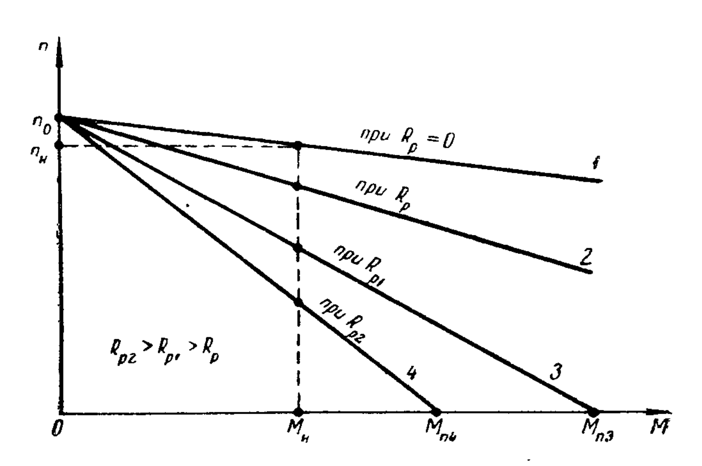



Рис. 74. Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения

Естественная механическая характеристика двигателя параллельного возбуждения является «жесткой», поскольку скорость вращения двигателя при изменении нагрузки на валу изменяется в очень небольших пределах. При введении в цепь якоря добавочного сопротивления «жесткость» механической характеристики уменьшается.

## § 43. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В двигателе последовательного возбуждения обмотка возбуждения соединена последовательно с обмоткой якоря, поэтому

$$I_в = I_я = I.$$

При изменении нагрузки на валу ток, потребляемый двигателем из сети, изменяется и, следовательно, изменяется магнитный поток возбуждения. Благодаря этой особенности двигатель последовательного возбуждения обладает свойствами, которые существенным образом отличаются от свойств двигателя параллельного возбуждения.

**1. Скоростная характеристика:**

$$n = f(I_я) \quad \text{при} \quad U = \text{const}.$$

Из выражения для скорости вращения

$$n = \frac{U - I_я R_{ця}}{c_E \Phi}$$

видно, что если пренебречь падением напряжения в цепи якоря по сравнению с напряжением на зажимах двигателя и не учитывать

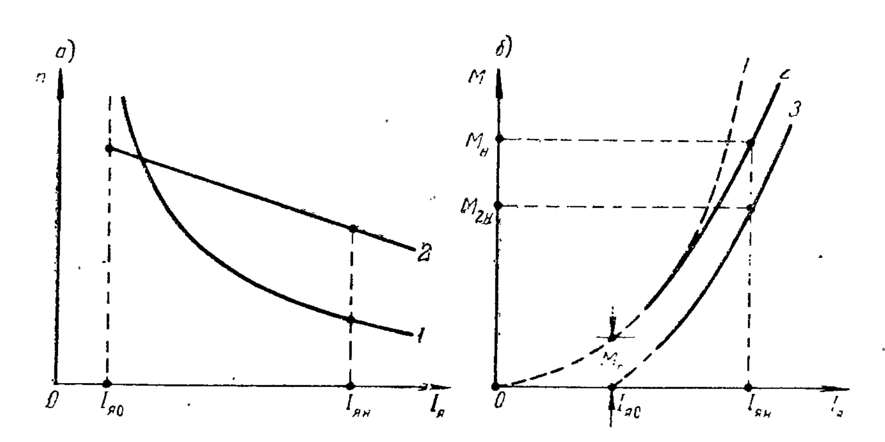



Рис. 75. Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения:
а) скоростные характеристики; б) моментная характеристика

насыщение магнитной системы и размагничивающее действие реакции якоря, то

$$n = \frac{\text{const}}{I_я},$$

т. е. в первом приближении скорость вращения двигателя последовательного возбуждения обратно пропорциональна току якоря.

В действительности при увеличении нагрузки на валу растет ток в якоре двигателя, в связи с чем увеличивается падение напряжения в цепи якоря, повышается насыщение магнитной цепи электрической машины и возрастает м. д. с. реакции якоря. Причем, если первый фактор вызывает снижение скорости вращения двигателя, то за счет действия двух последних процесс снижения скорости вращения замедляется, т. е. насыщение и реакция якоря, с одной стороны, и падение напряжения в цепи якоря, с другой, оказывают взаимопротивоположное влияние на скорость вращения двигателя. В результате этого действительная скоростная характеристика двигателя по своей форме приближается к гиперболе (кривая 1, рис. 75,а).

Поскольку при изменении нагрузки у двигателя последовательного возбуждения скорость вращения меняется в широких пределах, его скоростную характеристику принято называть «мягкой».

При небольших нагрузках, когда ток в якоре мал, скорость вращения двигателя резко возрастает и может превысить предельно допустимую величину. Такое чрезмерное увеличение скорости вращения, называемое разносом двигателя, представляет опасность для его механической прочности, так как в этом случае может произойти разрыв бандажей, выпучивание обмотки якоря, ослабление коллектора, разрушение шариковых подшипников и т. д. В связи с этим двигатели последовательного возбуждения не используются для привода таких агрегатов, у которых в процессе работы имеется холостой ход или очень маленький момент сопротивления. По этой же причине номинальное изменение скорости вращения у них рассматривается при изменении нагрузки в пределах от номинальной до одной четверти номинальной, т. е.

$$\Delta n = \frac{n_{1/4 н} - n_н}{n_н} 100.$$

Все сказанное выше справедливо в основном для электрических двигателей средней и большой мощности. У маломощных бортовых электродвигателей вследствие значительных потерь на трение в самом двигателе рост скорости вращения ограничен и поэтому работа при отсутствии тормозного момента на валу для них не представляет опасности. Скоростная характеристика такого двигателя несколько напоминает скоростную характеристику двигателя параллельного возбуждения (прямая *2*, рис. 75, а).

**Моментная характеристика:**

$$M = f(I_я) \quad \text{при} \quad U = \text{const}.$$

Если предположить, что магнитная система двигателя ненасыщена и магнитный поток пропорционален току якоря, то вращающий момент

$$M = c_M I_я \Phi = c'_M I_я^2$$

и, следовательно, зависимость $M = f(I_я)$ будет представлять собой параболу (кривая *1*, рис. 75,*б*). Однако подобное допущение справедливо только при малых и средних нагрузках на валу. При больших нагрузках, когда ток в якоре достигает значительной величины, наступает насыщение магнитной цепи двигателя. В этих условиях магнитный поток практически не зависит от тока якоря, поэтому можно считать, что вращающий момент двигателя

$$M = c''_M I_я .$$

Таким образом, действительная моментная характеристика двигателя последовательного возбуждения в начальной своей части представляет собой параболу, которая затем при больших нагрузках постепенно переходит почти в прямую линию (кривая *2*).

В случае установившегося режима работы вращающий момент двигателя уравновешивается полезным моментом на валу и моментом холостого хода:

$$M = M_2 + M_0 .$$

Момент холостого хода $M_0$ практически мало зависит от нагрузки на валу, поэтому, если считать $M_0 = \mathrm{const}$, то характеристика $M_2 = f(I_я)$ будет располагаться параллельно кривой $M = f(I_я)$ на расстоянии $M_0$ от нее (кривая *3*).

### 3. Механическая характеристика:

$$n = f(M) \quad \text{при} \quad U = \mathrm{const}.$$

При ненасыщенной магнитной системе вращающий момент двигателя последовательного возбуждения

$$M = c'_M I_я^2 ,$$

откуда

$$I_я = \sqrt{\frac{M}{c'_M}} .$$

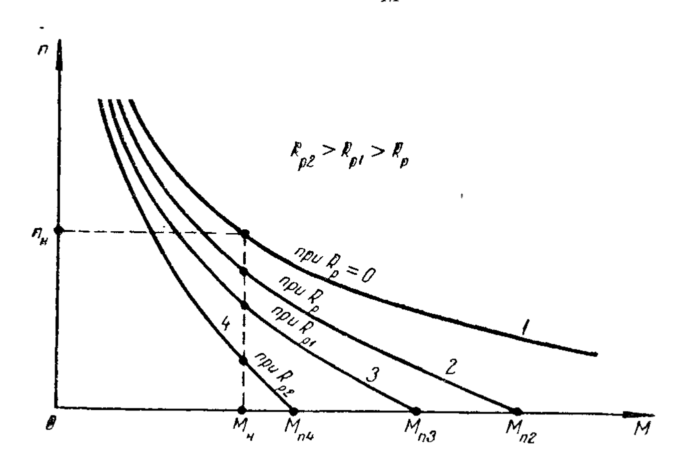



Рис. 76. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения

Чтобы получить уравнение механической характеристики, подставим выражение для тока якоря в формулу скорости вращения:

$$n = \frac{U - I_я R_{ця}}{c_E \Phi} = \frac{U}{c'_E I_я} - \frac{R_{ця}}{c'_E} = \frac{U}{c'_E \sqrt{\frac{M}{c'_M}}} - \frac{R_{ця}}{c'_E} .$$

Так как $U = \text{const}$, то

$$n = \frac{c_1}{\sqrt{M}} - c_2,$$

где $c_1 = U \frac{\sqrt{c'_M}}{c'_E}$ и $c_2 = \frac{R_{ця}}{c'_E}$.

Таким образом, механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения представляет собой гиперболу, асимптотически приближающуюся к оси ординат.

На рис. 76 изображены механические характеристики двигателя последовательного возбуждения для различных значений добавочного сопротивления $R_p$ в цепи якоря. Механическую характеристику при $R_p=0$ называют естественной (кривая 1), остальные механические характеристики — искусственными (кривые 2, 3 и 4). Так как при изменении нагрузки на валу скорость вращения двигателя последовательного возбуждения резко изменяется, механические характеристики его называют «мягкими».

## § 44. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

В электрических двигателях смешанного возбуждения основной обычно является параллельная обмотка возбуждения. Обмотка по-

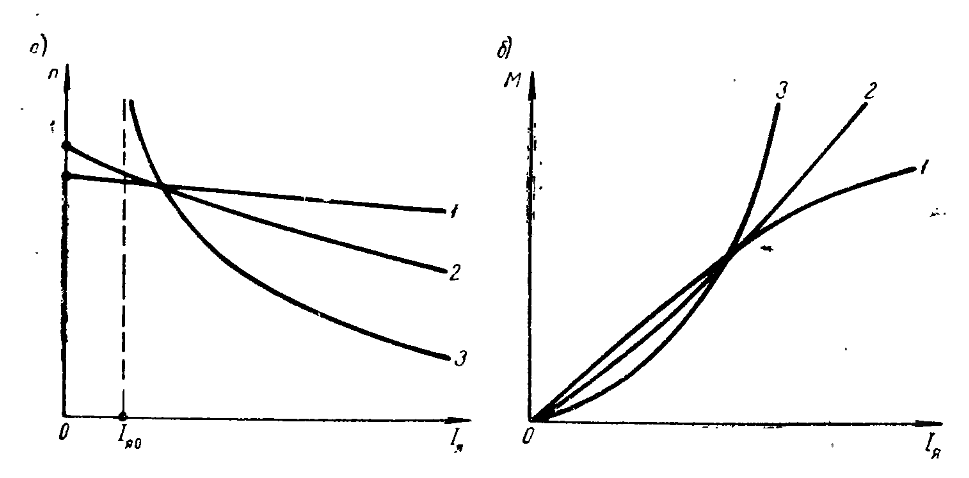



Рис. 77. Сравнение скоростных и моментных характеристик двигателей: 1—параллельное возбуждение; 2—смешанное возбуждение; 3—последовательное возбуждение

следовательного возбуждения включается согласно с параллельной и применяется как добавочная обмотка для улучшения пусковых свойств двигателя.

При согласном включении обмоток возбуждения двигатель смешанного возбуждения имеет более мягкую скоростную характеристику, чем двигатель параллельного возбуждения, и более жесткую, чем двигатель последовательного возбуждения (рис. 77,*а*). Моментная характеристика этого двигателя также занимает промежуточное положение между моментными характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения (рис. 77,*б*).

Двигатели смешанного возбуждения с основной последовательной и добавочной параллельной обмотками возбуждения, действующими согласно, применяются сравнительно редко. Параллельная обмотка в этом случае включается для того, чтобы ограничить величину скорости вращения при холостом ходе двигателя.

## § 45. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Из формулы

$$n = \frac{U - I_я(R_{ця} + R_p)}{c_E\Phi}$$

видно, что скорость вращения двигателя постоянного тока можно изменять следующими тремя способами:

а) введением сопротивления реостата $R_p$ в цепь якоря;

б) изменением магнитного потока возбуждения;

в) изменением подводимого к двигателю напряжения.

### 1. Регулирование скорости вращения посредством реостата в цепи якоря

Если напряжение сети, ток возбуждения и момент сопротивления на валу двигателя параллельного возбуждения будут постоянными, то при введении сопротивления реостата $R_p$ в цепь якоря ток в якоре в первый момент несколько уменьшается, вращающий момент двигателя падает и скорость вращения его снижается. Снижение скорости вращения приводит к уменьшению противо-э. д. с. и, следовательно, к росту тока в якоре. Поскольку магнитный поток двигателя не регулируется, равенство моментов снова восстанавливается при той же величине тока в якоре, но при меньшей скорости вращения.

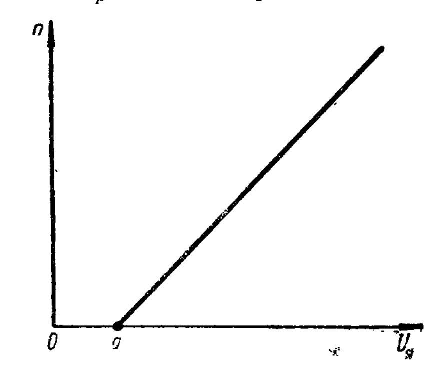



Рис. 78. Зависимость скорости вращения двигателя параллельного возбуждения от напряжения на зажимах якоря

Зависимость скорости вращения двигателя от подводимого к якорю напряжения $U_я$ изображается прямой линией (рис. 78). Отрезок $Oa = U_{тр}$ определяет напряжение трогания двигателя.

Регулирование скорости вращения двигателя последовательного возбуждения посредством реостата в цепи якоря происходит так же, как и двигателя параллельного возбуждения.

Рассмотренный способ регулирования скорости вращения двигателей малоэкономичен ввиду значительных потерь энергии в регулировочном реостате. Применяют его обычно для регулирования скорости вращения двигателей небольшой мощности, порядка 20—30 *вт*.

## 2. Регулирование скорости вращения изменением магнитного потока возбуждения

Для изменения магнитного потока двигателя параллельного возбуждения регулировочный реостат $r_p$ включают последовательно в цепь обмотки возбуждения (см. рис. 71,*а*).

При введении сопротивления $r_p$ в цепь возбуждения ток возбуждения, а значит, и магнитный поток двигателя уменьшаются. При постоянном моменте сопротивления на валу это приводит к снижению противо-э. д. с. и следовательно, к увеличению тока в якоре. Причем ток $I_я$ в этом случае возрастает настолько резко, что, несмотря на снижение магнитного потока возбуждения, вращающий момент двигателя увеличивается и скорость вращения его возрастает. По мере увеличения скорости вращения увеличивается противо-э. д. с., ток в якоре уменьшается и, следовательно, снижается вращающий момент двигателя. Через некоторый промежуток времени при новом значении магнитного потока равновесие моментов снова восстанавливается, но это уже будет при несколько бо́льшей скорости вращения и несколько бо́льшем токе якоря.

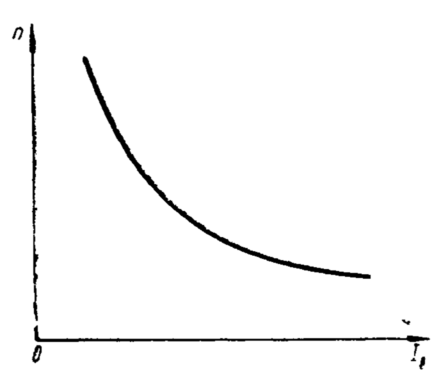


Рис. 79. Зависимость скорости вращения двигателя параллельного возбуждения от тока возбуждения

Если пренебречь падением напряжения в цепи якоря и насыщением магнитной системы двигателя, то

$$n = \frac{\text{const}}{I_в},$$

т. е. в первом приближении зависимость скорости вращения от тока возбуждения $n = f(I_в)$ по своей форме приближается к гиперболе (рис. 79).

Поскольку регулирование скорости вращения производится

при постоянной нагрузке на валу, т. е. $M = c_M I_я \Phi = M_2 + M_0 = \text{const}$, ток якоря при изменении магнитного потока также изменяется примерно по гиперболическому закону.

При чрезмерном ослаблении магнитного потока возбуждения скорость вращения двигателя может достичь очень больших значений. Однако увеличивать ее можно только до определенного предела, который определяется условиями коммутации и механической прочностью двигателя.

Случайный обрыв цепи возбуждения во время работы влечет за собой резкий подъем скорости вращения и увеличение тока в якоре, что в некоторых случаях может привести к «разносу», т. е. к аварии, электрического двигателя.

Так как ток возбуждения обычно не превышает 4—5% от номинального тока двигателя, потери в регулировочном реостате будут малы. В связи с этим рассматриваемый способ регулирования скорости вращения не только прост в выполнении, но и отличается высокой экономичностью.

Для регулирования скорости вращения двигателя последовательного возбуждения регулировочный реостат включают параллельно обмотке возбуждения или параллельно обмотке якоря (рис. 80).

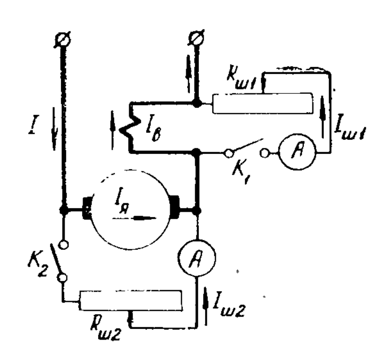



Рис. 80. Схема для регулирования скорости вращения двигателя последовательного возбуждения

При шунтировании обмотки возбуждения уменьшается ток, протекающий через эту обмотку. В результате ослабляется магнитный поток двигателя и увеличивается его скорость вращения.

Этот способ регулирования скорости вращения также обеспечивает двигателю сравнительно высокий к. п. д. Объясняется это тем, что реостат $R_{ш1}$ шунтирует участок цепи с небольшим падением напряжения на зажимах ($U_в \approx 1—3\%\ U_н$), поэтому потери в реостате будут малы.

При шунтировании обмотки якоря уменьшается ток в якоре двигателя и, следовательно, снижается падение напряжения в цепи якоря. На первый взгляд это должно было бы привести к росту скорости вращения двигателя. Однако в связи с уменьшением сопротивления всей цепи двигателя и увеличением тока в обмотке возбуждения его магнитное поле усиливается и скорость вращения снижается. Так как реостат $R_{ш2}$ шунтирует участок цепи со значительным падением напряжения. ($U_я = 97—99\%\ U_н$) в реостате будут довольно большие потери. Таким образом, этот способ регулирования позволяет только уменьшать скорость вращения двигателя при сравнительно низком к. п. д.

### 3. Регулирование скорости вращения изменением подводимого к двигателю напряжения

Этот способ регулирования скорости вращения может быть осуществлен при питании двигателя от отдельного генератора. Якорь двигателя $Д_1$, вращающего исполнительный механизм, присоединяется непосредственно к зажимам генератора независимого возбуждения *Г*, который, в свою очередь, приводится во вращение специальным приводным двигателем $Д_2$. Двигатель $Д_2$ и обмотка возбуждения исполнительного двигателя *ОВД* включаются в бортовую сеть летательного аппарата (рис. 81). Такая система называется системой Г-Д (генератор-двигатель). Регулирование скорости вращения по этой системе осуществляется за счет изменения тока возбуждения

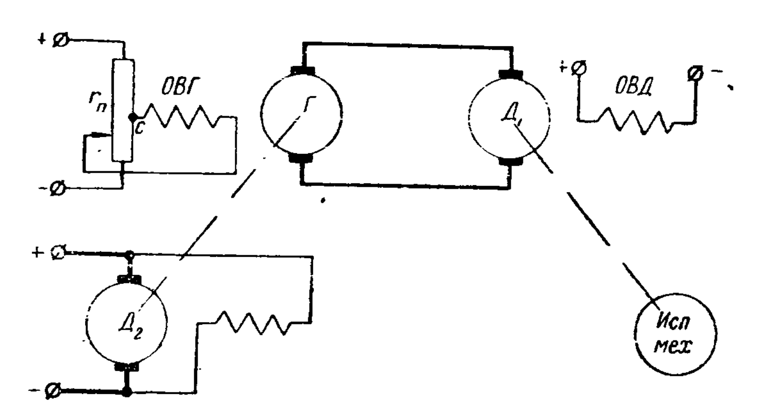



Рис. 81. Принципиальная схема системы генератор—двигатель

генератора. С этой целью в цепь обмотки возбуждения генератора *ОВГ* включается реостат $r_п$ по потенциометрической схеме.

При увеличении тока в цепи возбуждения генератора *Г* напряжение на зажимах исполнительного двигателя $Д_1$ повышается и его скорость вращения возрастает. При уменьшении тока возбуждения напряжение снижается и скорость вращения двигателя падает.

Так как регулирование скорости вращения двигателя осуществляется при постоянном моменте сопротивления на валу и постоянном токе в цепи возбуждения, зависимость $n = f(U)$ будет практически линейной.

Для изменения направления вращения исполнительного двигателя, т. е. реверса двигателя, движок реостата $r_п$ необходимо поставить в такое положение относительно средней точки *с*, чтобы изменилось направление тока в обмотке возбуждения генератора.

Система Г-Д применяется в тех случаях, когда требуется обеспечить плавное регулирование скорости вращения двигателя в широких пределах. На летательных аппаратах эта система исполь-

зуется, например, в схемах управления турелями и антеннами радиолокационных станций, причем в качестве генератора системы обычно применяется электромашинный усилитель с продольно-поперечным полем (см. главу XI).

## § 46. ИЗМЕНЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Для изменения направления вращения или реверсирования двигателя постоянного тока необходимо изменить знак у вращающего момента. Это достигается путем изменения направления тока в якоре или в обмотке возбуждения.

На практике в большинстве случаев реверсирование осуществляется за счет изменения направления тока в якоре, так как обмотка возбуждения обладает значительно бо́льшей индуктивностью, поэтому при переключении ее возникают большие перенапряжения и обгорают контакты переключателя.

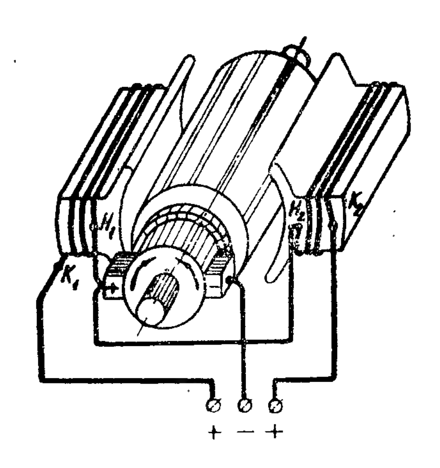



Рис. 82. Схема бортового реверсивного двигателя последовательного возбуждения

Бортовые двигатели последовательного возбуждения для реверсирования снабжаются двумя обмотками возбуждения, которые создают магнитные потоки противоположного направления (рис. 82). Каждая из обмоток используется для определенного направления вращения. Такой способ реверсирования отличается не только простотой, но и более высокой надежностью, чем применение переключателей для изменения направления тока в якоре или в обмотке возбуждения.

## § 47. СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЕЙ

Проведенный выше анализ характеристик двигателей постоянного тока позволяет произвести сравнительную оценку их эксплуатационных свойств и указать области их применения.

Двигатели параллельного возбуждения обладают не очень высокими пусковыми свойствами по сравнению с двигателями последовательного возбуждения. При прочих равных условиях у них больше пусковой ток и в то же время меньше пусковой момент, который к тому же очень зависит от колебаний напряжения сети.

Отличительной особенностью двигателей параллельного возбуждения является жесткая скоростная характеристика, поэтому их обычно применяют в тех случаях, когда для привода агрегатов требуется в значительной степени постоянная скорость вращения и

в то же время нет необходимости в большом пусковом моменте. К таким агрегатам, например, относятся топливные насосы, аэрофотоаппараты, электросбрасыватели и т. д.

Двигатели последовательного возбуждения обладают мягкой скоростной характеристикой и высокими пусковыми свойствами. По сравнению с другими типами двигателей постоянного тока они имеют меньший пусковой ток и больший пусковой момент, который, как это уже отмечалось выше, менее чувствителен к изменениям напряжения сети, чем пусковой момент двигателя параллельного возбуждения.

При резком увеличении нагрузки на валу мощность, потребляемая двигателем последовательного возбуждения из сети, изменяется в меньшей степени, чем это наблюдается у двигателя параллельного возбуждения. Последнее качество имеет большое практическое значение, особенно, если источником питания является аккумуляторная батарея.

На летательных аппаратах двигатели последовательного возбуждения применяются для привода таких агрегатов, где при трогании с места нужен большой пусковой момент, допускается изменение скорости вращения при изменении нагрузки на валу и исключена возможность работы вхолостую. Сюда, например, относятся рули, триммера, закрылки, жалюзи, сопла реактивных двигателей и т. д.

Бортовые двигатели смешанного возбуждения по своим пусковым свойствам обычно близки к двигателям последовательного возбуждения, но имеют ограниченную скорость вращения при холостом ходе. В связи с этим они используются в качестве стартеров для запуска турбореактивных двигателей, для привода центробежных насосов и т. д.

## § 48. СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРЫ

Стартер-генераторы применяются для запуска турбореактивных двигателей и для обеспечения электрической энергией потребителей летательного аппарата в полете.

Стартер-генератор представляет собой электрическую машину постоянного тока большей частью смешанного возбуждения, которая через редуктор жестко соединяется с валом турбореактивного двигателя. Для запуска двигателя стартер-генератор приключается к бортовой сети летательного аппарата и, работая в двигательном режиме, раскручивает вал турбореактивного двигателя.

В начале запуска стартер-генератор имеет смешанное возбуждение. Благодаря этому несколько ограничивается пусковой ток и создается большой пусковой момент, достаточный для преодоления момента сопротивления двигателя. На последнем этапе запуска, когда определенный момент начинает создавать турбина и вращающий момент стартер-генератора может быть уменьшен, необходимо обеспечить рост скорости вращения. С этой целью параллельная обмотка стартер-генератора отключается и он, будучи дви-

гателем последовательного возбуждения, начинает увеличивать скорость вращения, обеспечивая тем самым сопровождение турбореактивного двигателя. После окончания запуска двигателя стартер-генератор автоматически отключается от бортовой сети, а параллельная обмотка возбуждения присоединяется к угольному регулятору напряжения.

Включение стартер-генератора в бортовую сеть для работы в качестве генератора осуществляется дифференциальным минимальным реле. В генераторном режиме стартер-генератор работает без последовательной обмотки возбуждения, т. е. как генератор параллельного возбуждения.

---

*ГЛАВА VI*

# КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ И НАГРЕВАНИЕ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

## § 49. ПОТЕРИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

В процессе превращения одного вида энергии в другой в электрической машине постоянного тока имеют место потери в стали, потери в меди, потери в щеточном контакте, механические потери и добавочные потери.

### 1. Потери в стали

При вращении в магнитном поле электрической машины сталь якоря перемагничивается с частотой $f = \frac{pn}{60}$, поэтому в сердечнике якоря и зубцах будут **потери на гистерезис**, которые пропорциональны частоте перемагничивания и квадрату максимальной магнитной индукции:

$$p_г = c_г f B^2_{макс},$$

где $c_г$ — постоянная потерь на гистерезис, зависящая от марки стали.

Кроме того, в якоре магнитным полем наводятся токи, которые, замыкаясь в стали якоря, создают потери, называемые **потерями на вихревые токи**. Эти потери зависят от квадрата частоты и квадрата максимальной магнитной индукции:

$$p_{вх} = c_{вх} f^2 B^2_{макс},$$

где $c_{вх}$ — постоянная потерь на вихревые токи, зависящая от марки стали и толщины листов, из которых набран пакет якоря.

Суммарные потери в 1 *кг* стали

$$p_c = p_г + p_{вх}.$$

Эти потери в ваттах на килограмм массы для данной частоты перемагничивания $f$ и данного наибольшего значения магнитной индукции $B_{макс}$ определяются по формуле

$$p_c = p_{1/50}\left(\frac{f}{50}\right)^{\beta} B^2_{макс},$$

где $p_{1/50}$ — удельные потери в стали в *вт/кг* при частоте $f = 50$ *гц* и синусоидальном изменении магнитной индукции во времени с амплитудой $B_{макс} = 1$ *вб/м*$^2$; значения $p_{1/50}$ для различных марок электротехнической стали устанавливаются ГОСТ 802—58;

$\beta$ — показатель степени, зависящий от марки стали; для электротехнических сталей, легированных кремнием, $\beta = 1{,}2 \div 1{,}5$.

Полные потери в стали в ваттах

$$P_c = k_м p_c G_c.$$

Здесь $k_м$ — опытный коэффициент, учитывающий увеличение потерь из-за механической обработки стали;

$G_c$ — вес объема стали, подвергающегося перемагничиванию, *кг*.

В электрической машине постоянного тока потери в стали слагаются из потерь в стали сердечника якоря и потерь в зубцах.

## 2. Потери в меди

Потери в меди равны сумме потерь во всех обмотках машины. Потери в обмотке якоря и в обмотках, соединенных с якорем последовательно, определяются по формуле

$$P_м = I^2 R_\vartheta,$$

где $I$ — ток, протекающий в обмотке;

$R_\vartheta$ — сопротивление обмотки.

В соответствии с существующими нормами сопротивления обмоток электрической машины приводятся к расчетной рабочей температуре $\vartheta_2 = 75°C$. Для этого обычно используется зависимость

$$R_\vartheta = R_0[1 + \alpha_\vartheta(\vartheta_2 - \vartheta_1)].$$

Здесь $R_\theta$ — сопротивление обмотки в холодном состоянии при температуре $\vartheta_1$, а $\alpha_\vartheta$ — температурный коэффициент сопротивления меди, равный в среднем 0,004.

Согласно стандарту на электрические машины (ГОСТ 183-55) потери в регулирующих устройствах, включенных в цепи возбуждения, относят к потерям электрической машины, поэтому потери в параллельной цепи возбуждения вычисляют по формуле

$$P_в = U_в I_в,$$

где $U_в$ — напряжение на зажимах цепи возбуждения;
$I_в$ — ток возбуждения.

### 3. Потери в щеточном контакте

Сопротивление щеточного контакта не является постоянным. Оно зависит от материала и полярности щетки, плотности тока под щеткой, температуры переходного слоя, влажности окружающего воздуха, силы, с которой щетка прижимается к коллектору, и т. д.

Практика показывает, что, при прочих равных условиях, начиная с некоторого значения плотности тока под щеткой, сопротивление щеточного контакта изменяется почти обратно пропорционально току, протекающему через щетку, а падение напряжения в переходном слое $\Delta U_щ$ практически остается неизменным. В связи с этим при определении к. п. д. машины пользуются некоторыми средними значениями $\Delta U_щ$, установленными ГОСТ 183-55, а именно: для угольных и графитных щеток $\Delta U_щ = 1в$; для металлоугольных и металлографитных $\Delta U_щ = 0{,}3в$. Соответственно этому потери мощности в переходном щеточном контакте

$$P_щ = 2\Delta U_щ I_я.$$

### 4. Механические потери

Механические потери электрической машины включают в себя потери на трение щеток о коллектор, потери на трение в подшипниках и вентиляционные потери.

Потери на трение щеток о коллектор в ваттах определяют по формуле

$$P_{тщ} = k_щ p_щ S_щ v_к,$$

где $k_щ$ — коэффициент трения, равный в среднем 0,2 — 0,25;
$p_щ$ — удельное давление щеток на коллектор, которое обычно не превышает 5 — 6 *н/см*$^2$;
$S_щ$ — общая площадь соприкосновения щеток с коллектором, *см*$^2$;
$v_к$ — окружная скорость вращения коллектора, *м/сек*.

В бортовых электрических машинах применяют шариковые подшипники. Формула для определения потерь на трение в шариковых подшипниках в ваттах имеет вид

$$P_{mn} = k_{mp} N_{nш} v_{ц}.$$

Здесь $k_{mp}$ — коэффициент трения, равный 0,001 — 0,002;
$N_{nш}$ — давление на подшипник, *н*;
$v_{ц}$ — окружная скорость вращения цапфы, *м/сек*.

Вентиляционные потери, или потери на трение якоря о воздух, в ваттах подсчитываются по эмпирической формуле

$$P_{mв} = 1{,}1\, V v_{в}^{2},$$

где $V$ — количество воздуха, проходящего через машину, *м³/сек*;
$v_{в}$ — скорость движения воздуха, *м/сек*.

### 5. Добавочные потери

К добавочным потерям $P_{доб}$ относятся потери в полюсных наконечниках от пульсаций основного магнитного потока, вызванного зубчатым строением якоря, потери в меди обмоток на вихревые токи, потери, связанные с наличием добавочных токов в коммутирующих секциях, потери в уравнительных соединениях и т. д. Добавочные потери не поддаются точному учету, поэтому согласно ГОСТ 183-55 они принимаются равными 1% от полезной номинальной мощности для генератора или от подводимой номинальной мощности для двигателя.

## § 50. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Коэффициентом полезного действия называют отношение полезно отдаваемой мощности машины $P_2$ к подводимой мощности $P_1$, т. е.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} 100.$$

Для генератора заданной является полезная мощность $P_2$, поэтому выражение для к. п. д. генератора имеет вид:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum P} 100,$$

где $\sum P$ — суммарные потери.

Если электрическая машина работает двигателем, то известна подводимая мощность $P_1$, и к. п. д. удобнее определять из соотношения

$$\eta = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} 100.$$

Рассмотрим зависимость к. п. д. от тока в якоре $\eta = f(I_я)$, предполагая, что электрическая машина имеет параллельное возбуждение и работает в режиме двигателя.

Потери двигателя постоянного тока параллельного возбуждения можно разделить на три группы:

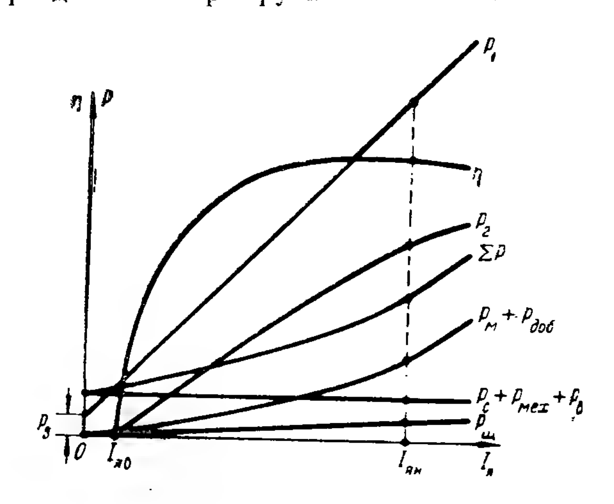



Рис. 83. Кривые потерь и к. п. д. электрической машины постоянного тока

1) потери, независящие от тока в якоре; к ним относятся потери в стали, механические потери и потери в меди параллельной обмотки возбуждения;

2) потери, пропорциональные току якоря, к которым относятся потери в переходном щеточном контакте;

3) потери, пропорциональные квадрату тока якоря, которые включают в себя потери в меди всех обмоток, соединенных последовательно с якорем, и добавочные потери.

Следовательно, можно написать:

$$\sum P = P_0 + k_1 I_я + k_2 I_я^2 .$$

Примерный вид кривых, характеризующих потери двигателя в зависимости от тока в якоре, представлен на рис. 83. Зависимость $P_1 = f(I_я)$ изображается прямой линией, поскольку предполагается постоянное напряжение на зажимах двигателя $U =$

$= \text{const}$ и постоянный ток в цепи возбуждения $I_в = \text{const}$. Полезная мощность двигателя $P_2 = P_1 - \sum P$, поэтому зависимость $P_2 = f(I_я)$ представляет собой кривую линию.

Так как при холостом ходе полезная мощность на валу двигателя отсутствует, его к. п. д. $\eta = 0$ и, следовательно, начало кривой $\eta = f(I_я)$ так же, как и начало кривой $P_2 = f(I_я)$, находится на оси абсцисс в точке $I_{я0}$, соответствующей току холостого хода.

При малых нагрузках, когда ток в якоре невелик, основную долю суммарных потерь составляют постоянные потери $P_0$, поэтому с увеличением нагрузки к. п. д. электрической машины быстро растет. По мере увеличения тока в якоре растут потери в меди цепи якоря и добавочные потери. В момент, когда потери, зависящие от квадрата тока в якоре, по своей величине будут равны постоянным потерям $(k_2 I_я^2 = P_0)$, к. п. д. электрической машины достигнет максимального значения. Дальнейший рост нагрузки будет сопровождаться некоторым снижением к. п. д. машины вследствие резкого увеличения потерь в меди.

Как правило, электрические машины рассчитываются так, чтобы наибольшее значение к. п. д. было бы при нагрузке, при которой электрическая машина работает наиболее продолжительное время. Обычно $\eta_{макс}$ соответствует нагрузке, составляющей 75—85% номинальной.

Современные бортовые электрические машины постоянного тока средней и большой мощности обладают сравнительно высокими номинальными к. п. д. Так, например, к. п. д. генераторов находится в пределах от 74 до 84%, а к. п. д. двигателей мощностью от 100 до 2500 *вт* колеблется от 60 до 75%. Исключение составляют бортовые электрические машины мощностью от 1 до 20 *вт*, к. п. д. которых, как правило, не превышает 30%.

## § 51. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О НАГРЕВАНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Энергия, потребляемая электрической машиной, частично превращается в полезную работу, частично выделяется в виде тепла и вызывает нагрев машины. При высоких температурах коллектора усиливаются ионные процессы в щеточном контакте, что приводит к сильному искрению под щетками и увеличению износа щеток. Кроме того, высокие температуры могут явиться причиной деформации коллектора и разрушения шариковых подшипников вследствие высыхания смазки и изменения их внутренних размеров. Самой чувствительной к нагреву является изоляция, которая при высоких температурах обугливается и разрушается.

По теплостойкости все электроизолирующие материалы подразделяются на три основных класса: А, В и С.

К изоляции класса А принадлежат хлопок, шелк, бумага и другие материалы органического происхождения, пропитанные или погруженные в жидкий диэлектрик, а также пластмассы с органиче-

ским заполнителем и состав, называемый эмалью, который применяется для изготовления эмалированной проволоки.

К изоляции класса В относятся изделия из слюды, асбеста, стеклянного волокна и других неорганических материалов с добавлением связующих веществ, причем с целью крепления могут быть применены изолирующие материалы класса А.

К изоляции класса С принадлежат слюда и стеклянная пряжа без вяжущих веществ, а также фарфор, стекло, кварц и другие подобные материалы.

Наибольшая температура $\vartheta_{макс}$, при которой изоляция сохраняет свои свойства в течение установленного срока службы, называется предельно допустимой температурой.

Каждому классу изоляции соответствует своя предельно допустимая температура, установленная на основании многолетнего опыта эксплуатации наземных электрических машин, а именно: для изоляции класса А $\vartheta_{макс} = 105$ °C; для изоляции класса В $\vartheta_{макс} = 130$ °C; для изоляции класса С $\vartheta_{макс}$ не нормируется.

Предельно допустимая температура для подшипников устанавливается $\vartheta_{макс} = 130$ °C, а для коллектора $\vartheta_{макс}$ соответствует предельно допустимой температуре изоляции обмотки якоря. Указанные значения $\vartheta_{макс}$ установлены в предположении, что срок службы наземных электрических машин составляет примерно 15 — 20 лет.

Если допустить более высокие температуры нагрева, чем предусмотрено нормами, то изоляция преждевременно стареет и срок службы ее сокращается. Практика показывает, что если, например, для изоляции класса А вместо 105 °C допустить температуру 120°C, то срок службы ее уменьшается на 50%, а при температуре 150 °C — на 90%. Если рабочую температуру поднять до 200 °C, то полная потеря изолирующих свойств у изоляции наступает через несколько часов.

Срок службы бортовых электрических машин исчисляется несколькими сотнями часов, поэтому для изоляции, а также для коллекторов и подшипников этих машин, установлены следующие предельно допустимые температуры: для изоляции класса А $\vartheta_{макс} = 160$ °C; для изоляции класса В $\vartheta_{макс} = 180$ °C; для коллектора $\vartheta_{макс} = 175$ °C; для подшипников $\vartheta_{макс} = 180$ °C. Предельно допустимая температура для изоляции класса С не нормируется.

В настоящее время в бортовых электрических машинах начинают широко использоваться теплостойкие электроизолирующие материалы, допускающие длительную работу при температурах нагрева 250—300 °C. Применение теплостойкой изоляции дает возможность, с одной стороны, допустить повышенные электромагнитные нагрузки в электрической машине и этим самым снизить ее габаритные размеры и вес, а с другой — обеспечить лучшее использование электрической машины по нагреву как на земле, так и на

высоте, где условия охлаждения машины значительно менее благоприятны вследствие уменьшения плотности охлаждающего воздуха.

Электрическая машина представляет собой сложную в тепловом отношении систему, состоящую из отдельных частей, выполненных из неоднородных материалов. Части машины отличаются друг от друга не только количеством выделяемого с их поверхности тепла, но и условиями рассеяния тепла в окружающую среду. В связи с этим при тепловом расчете приходится определять нагрев каждой части машины. Поскольку процесс нагревания твердых тел и особенно металлов в достаточной мере точно подчиняется законам нагревания однородного твердого тела, эти законы оказываются применимыми для теплового расчета электрических машин.

## § 52. ТЕОРИЯ НАГРЕВАНИЯ И ОХЛАЖДЕНИЯ ОДНОРОДНОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

При рассмотрении законов нагревания однородного твердого тела считаем, что все части тела нагреваются одинаково и рассеяние тепла происходит равномерно по всей поверхности тела.

Если количество тепла, выделяемое телом за 1 *сек*, обозначим через $Q$; то за время $dt$ в нем выделится $Qdt$ единиц тепла. Часть этого тепла пойдет на нагревание тела и приведет к повышению его температуры, а другая часть будет рассеиваться с поверхности тела в окружающее пространство. Предположим, что за время $dt$ температура тела возросла на $d\theta$ градусов, тогда количество тепла, идущее на нагревание тела весом $G$, будет

$$dQ_н = cGd\theta,$$

где $c$ — удельная теплоемкость, или количество тепла, необходимое для нагревания 1 *кг* данного вещества на 1 °С.

Количество тепла, которое за время $dt$ будет рассеиваться телом в окружающее пространство, зависит от размеров поверхности тела $S$, превышения температуры тела над температурой окружающей среды (перегрев тела) $\theta$ и коэффициента рассеяния тепла $\lambda$, т. е.

$$dQ_р = \lambda S\theta\, dt.$$

Коэффициент $\lambda$ равен количеству тепла, рассеиваемого за 1 *сек* с поверхности тела в 1 $см^2$ при перегреве тела на 1 °С.

Таким образом, процесс нагревания однородного твердого тела характеризуется следующим уравнением теплового баланса:

$$Q\, dt = dQ_н + dQ_р = cG\, d\theta + \lambda S\theta\, dt.$$

Если в теле каждую секунду выделяется одно и то же количество тепла, то с ростом температуры количество тепла, идущее на нагревание тела, будет уменьшаться, а количество тепла, рассеивае-

мое его поверхностью, будет увеличиваться. Температура тела будет повышаться до тех пор, пока не наступит тепловое равновесие. При тепловом равновесии тело достигнет наибольшей температуры перегрева $\theta_{макс}$, при которой все выделяемое им тепло будет рассеиваться в окружающую среду, т. е.

$$Q\,dt = \lambda S \theta_{макс}\,dt,$$

откуда

$$\theta_{макс} = \frac{Q}{\lambda S}.$$

Таким образом, конечное превышение температуры тела над температурой окружающей среды зависит от количества тепла, выделяемого телом в единицу времени, размеров поверхности тела и способности этой поверхности рассеивать тепло.

Воспользуемся полученным выражением для $\theta_{макс}$ и преобразуем уравнение теплового баланса следующим образом:

$$Q\,dt = cG\,d\theta + \frac{Q}{\theta_{макс}}\theta\,dt$$

или

$$\frac{d\theta}{\theta_{макс} - \theta} = \frac{dt}{\frac{cG\theta_{макс}}{Q}} = \frac{dt}{T}.$$

Здесь $T = \frac{cG\theta_{макс}}{Q}$ — постоянная величина, представляющая собой время, в течение которого однородное твердое тело, имеющее теплоемкость $c$ и вес $G$, при отсутствии рассеяния тепла достигает наибольшего перегрева $\theta_{макс}$. Постоянную $T$ называют постоянной времени нагревания.

Интегрируя обе части полученного дифференциального уравнения и предполагая, что в начальный момент нагревания температура тела равна температуре окружающей среды ($\theta = 0$), имеем:

$$\theta = \theta_{макс}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right),$$

где $e$ — основание натуральных логарифмов.

Следовательно, при нагревании температура однородного твердого тела возрастает по экспоненциальной кривой (кривая *1*, рис. 84). Отрезок *аб*, полученный в результате пересечения касательной к кривой $\theta = f(t)$ и горизонтальной прямой, проходящей на расстоянии $\theta_{макс}$ от оси абсцисс, равен $T$. Из уравнения нагревания видно, что конечного перегрева $\theta_{макс}$ тело достигает в течение бесконечно большого промежутка времени. Однако практически тепловой режим у тела устанавли-

вается уже при $t = 3T$, так как в этом случае перегрев тела отличается от $\theta_{макс}$ всего на 5%. Если после того, как тело достигнет перегрева $\theta_{макс}$, подвод тепла к нему будет прекращен, оно начнет охлаждаться и температура его будет снижаться. Решая уравнение теплового равновесия для этого случая

$$cG\,d\theta + \frac{Q}{\theta_{макс}}\theta\,dt = 0,$$

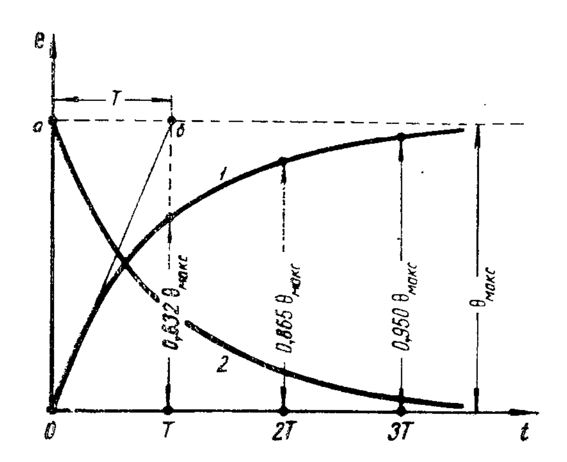



Рис. 84. Кривые нагревания и охлаждения однородного твердого тела

получим

$$\theta = \theta_{макс} e^{-\frac{t}{T}}.$$

Кривая охлаждения однородного твердого тела представлена на рис. 84 экспоненциальной кривой 2. Как видно из графика, эта кривая является зеркальным изображением кривой нагревания *1*.

## § 53. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Существующими нормами для электрических машин установлены три номинальных режима работы: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

Продолжительным режимом работы называется режим, при котором электрическая машина, имея номинальную нагрузку, работает столь длительно, что температуры отдельных ее частей достигают установившихся значений.

Кратковременным режимом работы называется режим, при котором электрическая машина имеет настолько непродолжительный период номинальной нагрузки, что рабочие части ее, нагреваясь до предельно допустимых температур, не достигают их

установившихся значений; период же остановки машины длится сравнительно долго, и она успевает практически полностью охладиться. Кривые нагревания и охлаждения для такого режима работы машины изображены на рис. 85,*а*.

**Повторно-кратковременным режимом** работы электрической машины называется режим, при котором кратковременные периоды работы при номинальной нагрузке чередуются с кратковременными остановками машины—паузами. Этот режим характеризуется относительной продолжительностью включения (ПВ), равной отношению продолжительности рабочего периода $t_p$ к продолжительности всего цикла, состоящего из рабочего периода и паузы $t_n$:

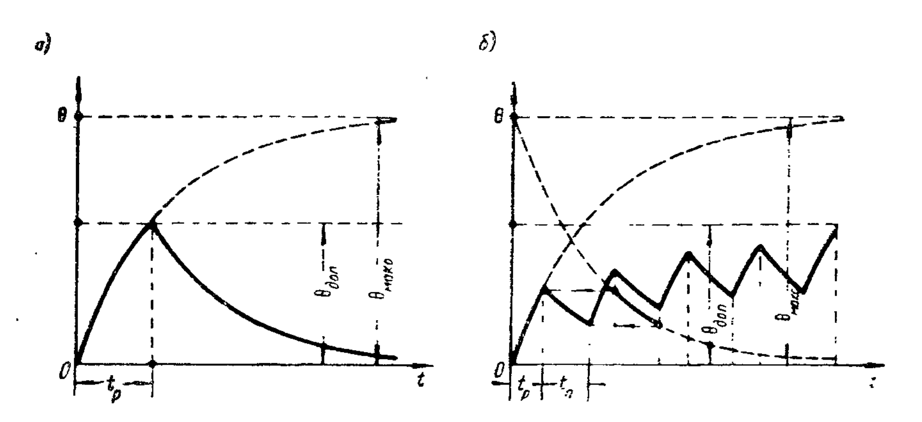



Рис. 85. Кривые нагревания и охлаждения электрической машины: а) при кратковременном режиме работы; б) при повторно-кратковременном режиме работы

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + t_n} 100.$$

Кривые нагревания и охлаждения машины при повторно-кратковременном режиме работы представлены на рис. 85,*б*.

## § 54. СПОСОБЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

В электрических машинах применяют различные способы отвода выделяющегося тепла.

**В машинах с самовентиляцией** вентиляция создается за счет вращающегося якоря, который при вращении увлекает за собой соприкасающиеся с ним частицы воздуха. Эта система охлаждения применяется обычно в бортовых электрических двигателях малой мощности, а также в двигателях большой мощности,

но кратковременного и повторно-кратковременного режимов работы.

В машинах с собственным охлаждением вентиляция осуществляется при помощи вентилятора, размещенного на валу машины. Если вентилятор располагается в начале вентиляционной цепи и воздух нагнетается в машину, то система вентиляции называется нагнетательной. Если вентилятор размещен в конце вентиляционной цепи и высасывает воздух из машины, то система вентиляции называется вытяжной.

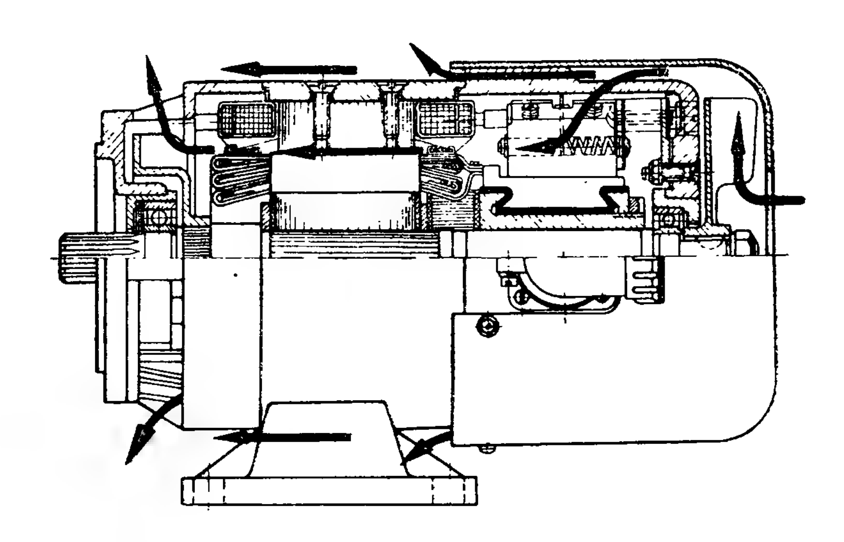


Рис. 86. Вытяжная система вентиляции и наружный обдув электрической машины

Нагнетательная система вентиляции отличается несколько меньшей эффективностью, чем вытяжная система, так как охлаждающий воздух, проходя через вентилятор, подогревается примерно на 5—10 °С и только после этого попадает в вентиляционные каналы машины.

Для обеспечения более интенсивного охлаждения в бортовых электрических машинах иногда устанавливают два вентилятора: один обеспечивает вытяжную вентиляцию, а другой осуществляет ее наружный обдув (рис. 86). В некоторых случаях, обычно в машинах сравнительно небольшой мощности, осуществляется только наружный обдув машины (рис. 87).

Система с собственным охлаждением применяется обычно в электрических двигателях продолжительного режима работы и в генераторах небольшой мощности.

В машинах с принудительным охлаждением для охлаждения используется встречный поток неподогретого за-

бортного воздуха, который во время полета продувается через машину. Эта система охлаждения получила широкое применение в генераторах, устанавливаемых на самолетах и крылатых ракетах.

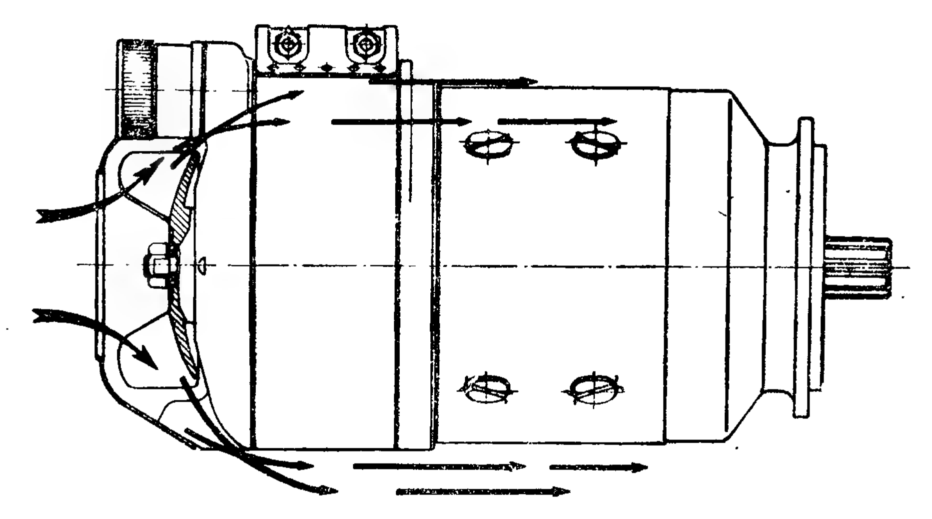


Рис. 87. Наружный обдув электрической машины

Охлаждающий воздух через воздухозаборный патрубок поступает в вентиляционные каналы генератора, охлаждает коллектор,

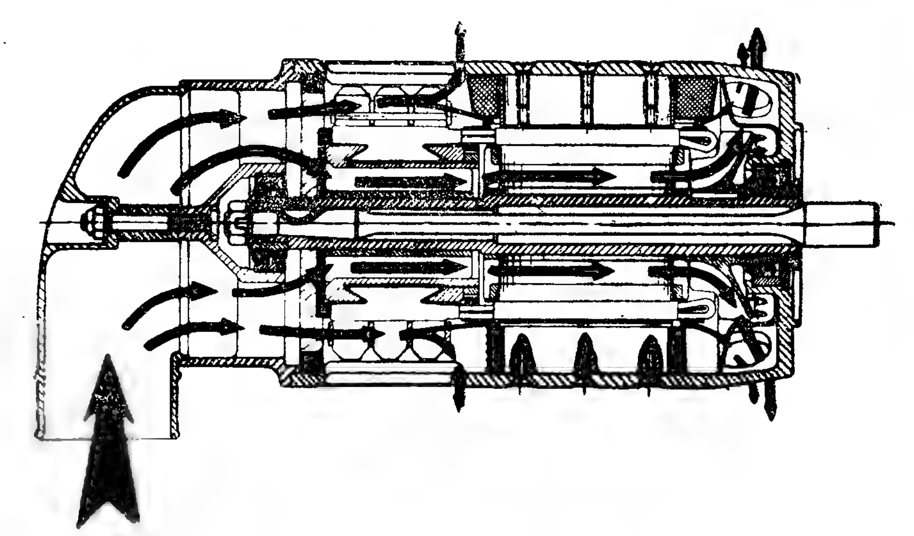


Рис. 88. Продув электрической машины встречным потоком воздуха

щеточный узел, катушки главных и дополнительных полюсов, обмотку и сталь якоря и выбрасывается наружу через окна в корпу-

се (рис. 88). Небольшая часть воздуха, омывающая коллектор и щетки, выходит из генератора наружу, не проходя вдоль всей машины. Чтобы обеспечить охлаждение генератора во время рулежки, при взлете и посадке самолета генератор снабжается вентилятором. Благодаря вентилятору при отсутствии продува генератор может отдавать в бортовую сеть самолета до 30% своей номинальной мощности. У бортовых генераторов небольшой мощности иногда выполняется смешанная система охлаждения, включающая в себя продув встречным потоком воздуха наиболее нагретой части машины — коллектора и наружный обдув корпуса (рис. 89).

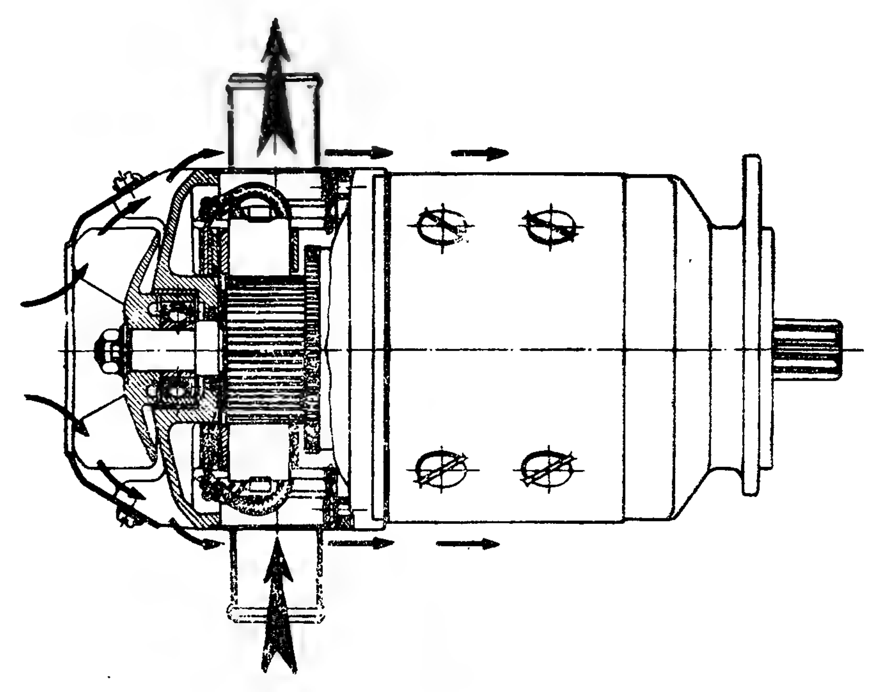


Рис. 89. Продув коллектора и наружный обдув электрической машины

Увеличение скорости и высоты полета самолетов и развитие ракетной техники поставили совершенно по новому вопросы охлаждения бортовых электрических машин. При сверхзвуковой скорости полета в результате трения происходит торможение воздушного потока, и частицы воздуха, прилегающие к поверхности летательного аппарата, теряя свою скорость, нагреваются. В связи с этим на большой высоте, где температура окружающей среды равна —56,5 °С, поверхность летательного аппарата и все его оборудование не только не охлаждаются, но, наоборот, нагреваются до значительной величины. Например, при скорости полета 2000 *км/час* самолет нагревается примерно до 100 °С, а при 2500 *км/час* — до 160 °С, т. е. фактически достигает предельно допустимой темпера-

туры, установленной существующими нормами для обмоток бортовых электрических машин с изоляцией класса А.

В связи с этим принудительная система охлаждения при скорости полета, значительно превышающих скорость звука, из-за высокой температуры охлаждающего воздуха становится малоэффективной. Поэтому в новых условиях особенное значение получает использование в бортовых электрических машинах теплостойкой изоляции, допускающей температуры нагрева до 250—300 °С, а также применение новых способов охлаждения.

В настоящее время изучается возможность применения в бортовых электрических машинах жидкостного охлаждения, а также охлаждения путем испарения жидкости с внутренних поверхностей машины. При жидкостном охлаждении в качестве охлаждающей жидкости может использоваться вода, масло или топливо. Жидкость прогоняется по каналам электрической машины с помощью насоса. При испарительной системе охлаждения жидкость, обычно вода, вводится под давлением в электрическую машину, где распыляется специальными форсунками на нагретые части машины. Образующийся при этом пар отводится в конденсационное устройство, там он превращается в воду, которая снова поступает в машину.

---

# Раздел второй

# ТРАНСФОРМАТОРЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

*ГЛАВА VII*

## ТРАНСФОРМАТОРЫ

### § 55. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока другого напряжения.

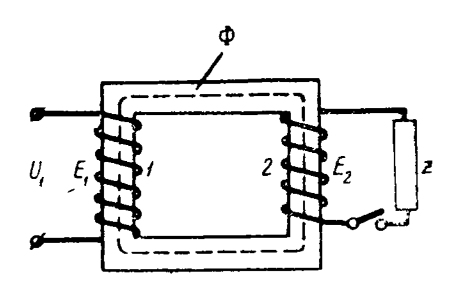



Рис. 90. Схема однофазного трансформатора

Впервые трансформатор был построен русским ученым П. Н. Яблочковым в 1876 г. и применен в схемах питания дуговых ламп.

Простейший однофазный трансформатор представляет собой стальной сердечник (магнитопровод), на котором намотаны две обмотки (рис. 90). Если к обмотке *1* трансформатора подвести переменное напряжение $U_1$, то по цепи этой обмотки будет протекать переменный ток, который создаст переменный магнитный поток Ф, замыкающийся по сердечнику. За счет этого потока в обмотке *1* будет наводиться э. д. с. самоиндукции $E_1$, а в обмотке *2* э. д. с. взаимоиндукции $E_2$. Если к обмотке *2* теперь приключить нагрузку $z$, то в ней появится переменный ток.

Обмотка, к которой подводится электрическая энергия переменного тока, называется первичной, а обмотка, от которой энергия отводится к потребителям, — вторичной. Если первич-

ная обмотка является обмоткой низкого напряжения (НН), а вторичная — обмоткой высокого напряжения (ВН), то такой трансформатор называется повышающим. У понижающего трансформатора, наоборот, первичной будет обмотка высокого напряжения (ВН), а вторичной — низкого напряжения (НН).

При наличии первичной и одной вторичной обмоток трансформатор называется двухобмоточным. Если у трансформатора будет несколько вторичных обмоток, рассчитанных на различное напряжение, то он называется многообмоточным.

Трансформаторы применяются для преобразования энергии однофазного и трехфазного переменного тока, поэтому по числу фаз они подразделяются на однофазные и трехфазные.

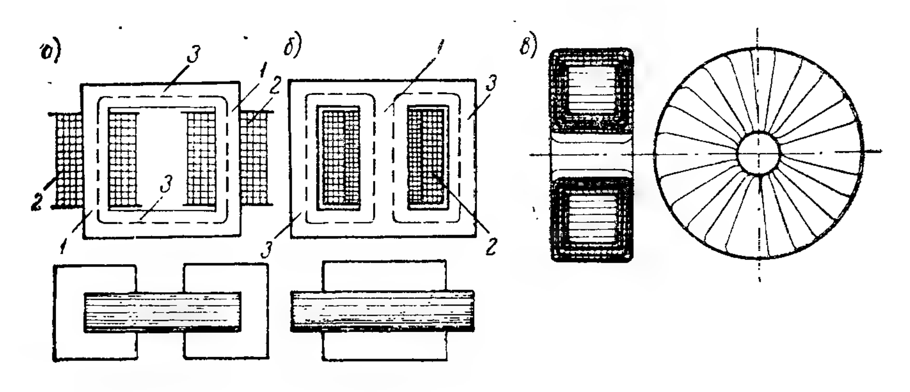



**Рис. 91. Однофазные трансформаторы:**
**а) стержневой; б) броневой; в) тороидальный**

По конструктивному исполнению магнитопровода трансформаторы подразделяются на стержневые, броневые и тороидальные.

Магнитопровод стержневого однофазного трансформатора состоит из стержней *1*, на которых размещены обмотки *2*, а также верхнего и нижнего ярма *3*, которые связывают между собой стержни, образуя таким образом замкнутую магнитную цепь (рис. 91, *а*). Стержневые трансформаторы просты и удобны в изготовлении и имеют сравнительно благоприятные условия охлаждения обмоток. У них меньше расход меди, чем у других типов трансформаторов, но обмотки недостаточно хорошо защищены от механических повреждений.

В броневом однофазном трансформаторе ярма *3* расположены по обе стороны от стержня *1*, на котором размещены обмотки трансформатора (рис. 91, *б*). Благодаря этому обмотки у броневого трансформатора лучше защищены от механических повреждений, чем у трансформатора стержневого. В связи с тем, что магнитный поток, проходящий по стержню, в ярме раздваивается на две части, сечение ярма делается приблизительно вдвое меньше, чем сечение стержня. Расход обмоточной меди у броневых транс-

форматоров больше, чем у стержневых, ввиду большей средней длины витка; условия охлаждения обмоток хуже, но коэффициент заполнения окна обмоточным проводом выше.

Магнитопроводы стержневых и броневых трансформаторов, с целью снижения потерь на вихревые токи, набираются из отдельных пластин толщиной 0,2—0,35 *мм*, которые изолируются друг от друга теплостойким кремниевым лаком. Пластины штампуются из листовой электротехнической стали с высоким содержанием кремния (до 4,5—5%) или чаще из специальной высоколегированной трансформаторной стали, обладающей повышенной магнитной проницаемостью и малыми магнитными потерями. Для магнитопроводов стержневого типа обычно используются пластины Г-образной или П-образной формы, а магнитопроводы броневых трансформаторов набираются из пластин Ш-образной формы. Таким образом, при штамповке пластин ярма выштамповываются заодно со стержнем. В сечении магнитопровод трансформатора имеет форму квадрата или прямоугольника.

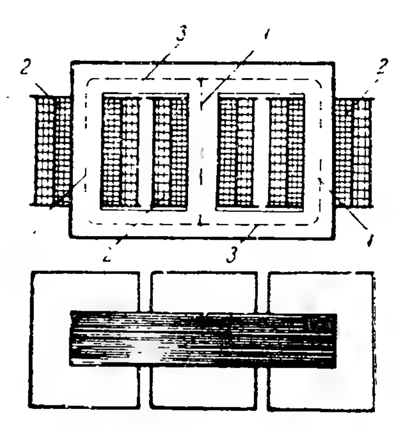



**Рис. 92. Трехфазный стержневой трансформатор**

Магнитопроводы тороидальных трансформаторов навиваются на специальных станках из специальной стальной ленты толщиной 0,08 *мм*, имеющей высокие магнитные свойства. Перед навивкой магнитопровода на ленту наносится тонкий слой изоляции. Тороидальные трансформаторы (рис. 91, *в*) имеют простую технологию изготовления, высокий коэффициент заполнения объема активными материалами, но сравнительно неблагоприятные условия охлаждения. В отличие от предыдущих типов трансформаторов у них практически отсутствует внешнее магнитное поле рассеяния, поэтому при работе они не оказывают влияния на элементы той схемы, в которую они включены. Многообмоточные тороидальные трансформаторы получили широкое применение в бортовой радиотехнической аппаратуре.

Бортовые трехфазные трансформаторы выполняются стержневого типа. Магнитопровод такого трансформатора набирается из пластин Ш-образной формы. Он имеет три стержня *1* и два ярма *3* (рис. 92). На каждом стержне размещается первичная и вторичная обмотки одной фазы трансформатора.

Обмотки бортовых трансформаторов выполняются в виде катушек, которые изготовляются из медного обмоточного провода обычно с теплостойкой изоляцией, допускающей нагревы до 250—300 °С. Для намотки катушек трансформаторов с тороидальными

сердечниками применяют провода с лакошелковой изоляцией, а в случае необходимости — провода с теплостойкой изоляцией. С целью лучшего охлаждения обмотка низкого напряжения у бортовых трансформаторов располагается обычно снаружи.

По способу охлаждения трансформаторы подразделяются на трансформаторы с воздушным охлаждением и трансформаторы с масляным охлаждением. Для охлаждения последних применяют специальное минеральное масло, которым заполняют бак трансформатора. Это масло обладает хорошими изолирующими свойствами, обеспечивает хороший отвод тепла и предохраняет обмотки трансформатора от проникновения влаги. Бортовые трансформаторы обычно имеют воздушное охлаждение.

В зависимости от назначения трансформаторы подразделяются на силовые, измерительные и трансформаторы специального назначения. Силовые трансформаторы применяются для передачи и распределения электрической энергии. Измерительные трансформаторы используются для включения электроизмерительных приборов в электрические цепи большой мощности и высокого напряжения. Специальные трансформаторы в каждом отдельном случае имеют свое назначение; к ним относятся, например, сварочные, печные и стабилизирующие трансформаторы.

Для преобразования напряжения в небольших пределах служат автотрансформаторы.

Мощность современных трансформаторов, устанавливаемых на летательных аппаратах, колеблется от единиц вольтампера до нескольких тысяч вольтампер, а их напряжение — от нескольких вольт до нескольких тысяч вольт. Бортовые трансформаторы рассчитываются на повышенную частоту и у них обычно допускаются высокие электромагнитные и тепловые нагрузки. Поэтому по сравнению с наземными трансформаторами они имеют относительно ма-

*Таблица 4*

| Мощность, *ва* | Число фаз | Напряжение, *в* | | Ток в фазе, *а* | | Напряжение короткого замыкания, % | $\frac{I_0}{I_н}$, % | К. п. д., % | Вес, *г* | Рабочая температура, °С |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | первичное | вторичное | первичный | вторичный | | | | | |
| 50 | 1 | 115 | 28 | 0,5 | 1,78 | 8,62 | 15,9 | 87,5 | 260 | 280 |
| 150 | 3 | 200 | 36 | 0,5 | 2,4 | 9,1 | 20,0 | 86,5 | 580 | |
| 500 | 1 | 200 | 28 | 2,68 | 17,8 | 5,2 | 5,7 | 93,5 | 870 | |
| 2000 | 3 | 200 | 28 | 6,17 | 41,2 | 4,12 | 4,8 | 93,5 | 2340 | |
| 6000 | 3 | 200 | 28 | 18,4 | 124,0 | 6,9 | 2,5 | 94,5 | 5770 | |

лый вес, небольшие габаритные размеры, но зато и сравнительно небольшой срок службы.

Номинальные данные трансформатора (мощность, первичное и вторичное напряжение, первичный и вторичный ток, частота и др.) указываются на его заводском щитке. За номинальную мощность трансформатора принимают мощность в вольтамперах на зажимах вторичной обмотки трансформатора.

В таблице 4 приведены основные данные некоторых силовых трансформаторов, применяемых на летательных аппаратах.

## § 56. Э. Д. С., НАВОДИМЫЕ В ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРА

Предположим, что к первичной обмотке трансформатора приложено синусоидальное напряжение $U_1$, тогда э. д. с. $E_1$, наводимая в этой обмотке, тоже должна изменяться по синусоидальному закону, так как только в этом случае она будет уравновешивать приложенное напряжение.

Если э. д. с. $E_1$ будет синусоидальной, то полезный магнитный поток

$$\Phi = \Phi_{макс} \sin \omega t.$$

За счет этого потока в первичной и во вторичной обмотках трансформатора будут наводиться э. д. с.

Мгновенное значение э. д. с. первичной обмотки

$$e_1 = - w_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

где $w_1$ — число витков этой обмотки. Следовательно,

$$e_1 = - w_1 \omega \Phi_{макс} \cos \omega t = w_1 \omega \Phi_{макс} \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

т. е. э. д. с. $e_1$ отстает по фазе от создающего ее потока на угол $\frac{\pi}{2}$.

Максимальное и действующее значения э. д. с. первичной обмотки будут соответственно равны:

$$E_{1\,макс} = w_1 \omega \Phi_{макс} = 2\pi w_1 f \Phi_{макс}$$

и

$$E_1 = \frac{E_{1\,макс}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} w_1 f \Phi_{макс} = 4{,}44 w_1 f \Phi_{макс}.$$

Если магнитный поток будет измеряться не в веберах, а в максвеллах, то

$$E_1 = 4{,}44 w_1 f \Phi_{макс} \cdot 10^{-8}.$$

Аналогичным путем получается и выражение для действующего значения э. д. с. вторичной обмотки:

$$E_2 = 4{,}44 w_2 f \Phi_{макс}.$$

Таким образом, э. д. с., наводимые в обмотках трансформатора при синусоидальном изменении магнитного потока, пропорциональны числу витков обмотки, частоте и максимальному значению магнитного потока, сцепленному с этой обмоткой.

Отношение э. д. с. обмотки высшего напряжения к э. д. с. обмотки низшего напряжения называется **коэффициентом трансформации**. Если трансформатор понижающий, то

$$k_m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4{,}44 w_1 f \Phi_{макс}}{4{,}44 w_2 f \Phi_{макс}} = \frac{w_1}{w_2},$$

т. е. коэффициент трансформации равен отношению числа витков обмотки высшего напряжения к числу витков обмотки низшего напряжения.

## § 57. ХОЛОСТОЙ ХОД ТРАНСФОРМАТОРА

**Холостым ходом** называют режим, при котором к первичной обмотке трансформатора подведено переменное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута, т. е. ток во вторичной цепи равен нулю.

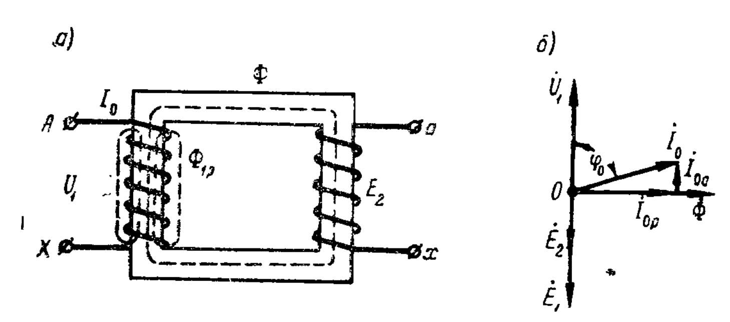



Рис. 93. Холостой ход трансформатора:
а) принципиальная схема; б) векторная диаграмма

При подключении трансформатора к сети по его первичной обмотке протекает **ток холостого хода** $I_1 = I_0$, который создает магнитный поток. Часть этого потока Ф замыкается по магнитопроводу и наводит в обмотках трансформатора э. д. с. $E_1$ и $E_2$, другая часть $\Phi_{1p}$ проходит в основном через воздух и сцепляется с витками только первичной обмотки (рис. 93,*а*). Этот поток называется **потоком рассеяния**. Магнитный поток Ф, изменяясь с частотой тока, перемагничивает сталь транс-

форматора, вызывая тем самым в ней потери на гистерезис и вихревые токи. Следовательно, ток холостого хода $\dot{I}_0$ должен иметь две составляющие: реактивную намагничивающую составляющую $\dot{I}_{0p}$, создающую магнитный поток $\dot{\Phi}$, и активную составляющую $\dot{I}_{0a}$, которая обусловливается потерями в стали трансформатора. Реактивная составляющая $\dot{I}_{0p}$ совпадает по фазе с магнитным потоком $\dot{\Phi}$, а активная составляющая $\dot{I}_{0a}$ опережает этот поток на угол $\frac{\pi}{2}$ (рис. 93,*б*).

Ток холостого хода у наземных трансформаторов обычно не превышает 10% от номинального тока. У бортовых трансформаторов величина его иногда несколько возрастает вследствие повышенных магнитных потерь в стали.

За счет магнитного потока рассеяния $\Phi_{1p}$ в первичной обмотке трансформатора будет наводиться э. д. с. рассеяния $E_{1p}$. Поскольку поток рассеяния замыкается в основном по воздуху, обладающему постоянной магнитной проницаемостью, можно считать, что он и, следовательно, э. д. с. рассеяния пропорциональны току холостого хода. Иначе говоря, $E_{1p} = x_1 I_0$, где $x_1$ — коэффициент пропорциональности, который рассматривается как индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки трансформатора. Падение напряжения на этом сопротивлении эквивалентно влиянию э. д. с. рассеяния.

Согласно второму закону Кирхгофа для первичной цепи трансформатора можно написать следующее уравнение:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{1p} = \dot{I}_0 r_1$$

или

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1p} + \dot{I}_0 r_1,$$

где $r_1$ — активное сопротивление первичной обмотки трансформатора.

Полное сопротивление первичной обмотки трансформатора будет:

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2}.$$

Поскольку ток холостого хода $I_0$ у трансформатора мал, э. д. с. рассеяния $E_{1p}$ и падением напряжения $I_0 r_1$ по сравнению с напряжением $U_1$ можно пренебречь и считать, что при холостом ходе напряжение, приложенное к первичной обмотке трансформатора, практически уравновешивается э. д. с. $E_1$, т. е.

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1.$$

На рис. 93, *б* представлена упрощенная векторная диаграмма трансформатора при холостом ходе. Как видно из векторной диа-

граммы, угол сдвига фаз между током холостого хода $\dot{I}_0$ и приложенным напряжением $\dot{U}_1$ близок к 90°, поэтому коэффициент мощности у трансформаторов при холостом ходе обычно не превышает $\cos \varphi_0 = 0{,}3$.

В режиме холостого хода, когда вторичная цепь трансформатора разомкнута и полезная мощность $P_2$ равна нулю, мощность, подводимая к трансформатору, практически расходуется на покрытие потерь в стали:

$$P_1 = P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0 \approx P_c,$$

так как потери в меди первичной обмотки трансформатора при этом ничтожно малы.

При холостом ходе $E_1 \approx U_1$ и $E_2 = U_2$, поэтому отношение напряжений на зажимах обмоток трансформатора определяет коэффициент трансформации. В случае понижающего трансформатора

$$k_m = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2}.$$

## § 58. РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРА НА НАГРУЗКУ

При включении нагрузки во вторичной обмотке трансформатора появится ток $I_2$. В первый момент это вызовет ослабление магнитного потока Ф и, как результат этого, уменьшение величины э. д. с. $E_1$, уравновешивающей первичное напряжение трансформатора $U_1$. Однако с уменьшением э. д. с. $E_1$ возрастет ток $I_1$ и, следовательно, увеличится м. д. с. первичной обмотки $F_1 = I_1 w_1$, что приведет к увеличению магнитного потока Ф практически до прежней величины. Объясняется это следующим образом.

При изменении нагрузки в пределах от нуля до номинального значения падение напряжения в первичной обмотке трансформатора мало по сравнению с э. д. с. $E_1$ и, следовательно, напряжение $U_1$ практически уравновешивается этой э. д. с., т. е. $E_1 \approx U_1$. Если напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора будет постоянным: $U_1 = \text{const}$, то при изменении нагрузки величина э. д. с. $E_1$ также не должна изменяться. Это условие, очевидно, выполнимо только тогда, когда магнитный поток трансформатора будет оставаться постоянным.

Следовательно, если при холостом ходе для обеспечения основного магнитного потока трансформатора Ф требуется м. д. с. $F_0 = I_0 w_1$, то такая же по величине м. д. с. нужна будет при работе трансформатора на нагрузку, когда магнитный поток Ф создается м. д. с. двух обмоток: $F_1 = I_1 w_1$ и $F_2 = I_2 w_2$.

Таким образом, для нагруженного трансформатора можно написать следующее уравнение равновесия м. д. с.:

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2$$

или

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 + (-\dot{I}_2 w_2).$$

Из полученного уравнения видно, что м. д. с. первичной обмотки компенсирует размагничивающее действие м. д. с. вторичной обмотки и обеспечивает создание в сердечнике трансформатора необходимого магнитного потока.

В режиме нагрузки около обмоток трансформатора за счет протекающих в них токов $I_1$ и $I_2$ создаются соответственно магнитные потоки рассеяния $\Phi_{1p}$ и $\Phi_{2p}$, которые в основном замыкаются через воздух (рис. 94). Каждый из этих потоков сцепляется с витками только своей обмотки и индуктирует в ней э. д. с. рассеяния. В первичной обмотке трансформатора наводится, таким образом, э.д.с. рассеяния $E_{1p}$, а во вторичной обмотке э. д. с. рассеяния $E_{2p}$.

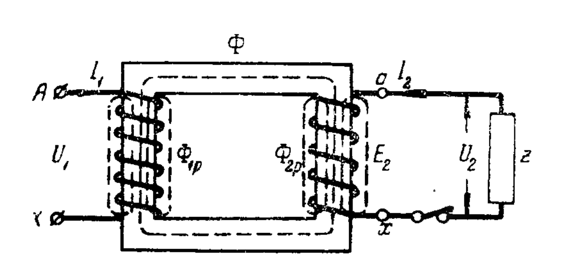



Рис. 94. Принципиальная схема трансформатора при работе на нагрузку

Так же, как и при холостом ходе, для первичной цепи трансформатора справедливо следующее уравнение равновесия э.д.с.:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{1p} = \dot{I}_1 r_1$$

или

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1p} + \dot{I}_1 r_1.$$

Во вторичной обмотке трансформатора при нагрузке индуктируются э. д. с. $E_2$ и $E_{2p}$, которые уравновешиваются падениями напряжения на активном сопротивлении обмотки трансформатора $I_2 r_2$ и на сопротивлении нагрузки $I_2 z = U_2$.

Следовательно, уравнение второго закона Кирхгофа для вторичной цепи трансформатора имеет вид:

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{2p} = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 r_2$$

или

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 + \dot{E}_{2p} - \dot{I}_2 r_2.$$

Так как поток рассеяния $\Phi_{2p} \equiv I_2$, то $E_{2p} = x_2 I_2$, где $x_2$ — индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки трансформатора.

Полное сопротивление вторичной обмотки трансформатора равно:

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2}.$$

## § 59. ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НАГРУЗКЕ

При построении векторной диаграммы трансформатора для э. д. с. и токов первичной и вторичной цепи всегда принимают один масштаб. Однако, если трансформатор обладает большим коэффициентом трансформации, построение такой диаграммы может оказаться трудно выполнимой задачей, так как векторы первичных и вторичных напряжений и токов получаются совершенно несоизмеримыми друг с другом. Например, у понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации $k_m = 100$ вектор вторичной э. д. с. $\dot{E}_2$ будет в сто раз короче вектора первичной э. д. с. $\dot{E}_1$, а вектор вторичного тока $\dot{I}_2$, наоборот, будет примерно в сто раз длиннее вектора тока $\dot{I}_1$. Поэтому для удобства построения векторной диаграммы реальный трансформатор заменяют приведенным (эквивалентным). У приведенного трансформатора первичная обмотка остается такой же, как у реального, а вторичная обмотка заменяется некоторой эквивалентной обмоткой с числом витков, равным числу витков первичной обмотки. При этом сохраняются мощность трансформатора и фазы векторов вторичной цепи.

Например, чтобы получить приведенную вторичную э. д. с. $E'_2$, необходимо значение э. д. с. $E_2$ изменить пропорционально коэффициенту трансформации, а именно:

$$E'_2 = E_1 = E_2 \cdot \frac{w_1}{w_2} = E_2 k_m.$$

Так как при приведении мощность трансформатора не изменяется, то

$$E'_2 I'_2 = E_2 I_2,$$

откуда приведенное значение тока вторичной обмотки

$$I'_2 = I_2 \frac{E_2}{E'_2} = I_2 \frac{1}{k_m}.$$

Приведенное значение активного сопротивления вторичной обмотки трансформатора $r'_2$ получается из условия, что потери в меди у реального и приведенного трансформаторов будут одни и те же, т. е.

$$P_{м2} = I_2^2 r_2 = I'^2_2 r'_2,$$

следовательно,

$$r'_2 = r_2 \left(\frac{I_2}{I'_2}\right)^2 = r_2 k_m^2.$$

Аналогично приведенные значения индуктивного и полного сопротивлений вторичной обмотки трансформатора будут равны:

$$x'_2 = x_2 k_m^2 \quad \text{и} \quad z'_2 = z_2 k_m^2.$$

Векторная диаграмма приведенного трансформатора для случая смешанной активно-индуктивной нагрузки построена на рис. 95.

Построение векторной диаграммы начинаем с вектора магнитного потока $\dot{\Phi}$, который откладываем в положительном направлении оси абсцисс. Затем под углом $\delta$ к вектору $\dot{\Phi}$ проводим вектор тока холостого хода $\dot{I}_0$. Угол $\delta$ определяется величиной потерь в стали трансформатора. Далее откладываем векторы э. д. с. $\dot{E}_1$ и $\dot{E}'_2$, которые отстают от потока $\dot{\Phi}$ на угол 90°. Так как у приведенного трансформатора $k_m = 1$, векторы э. д. с. $\dot{E}_1$ и $\dot{E}'_2$ будут равны.

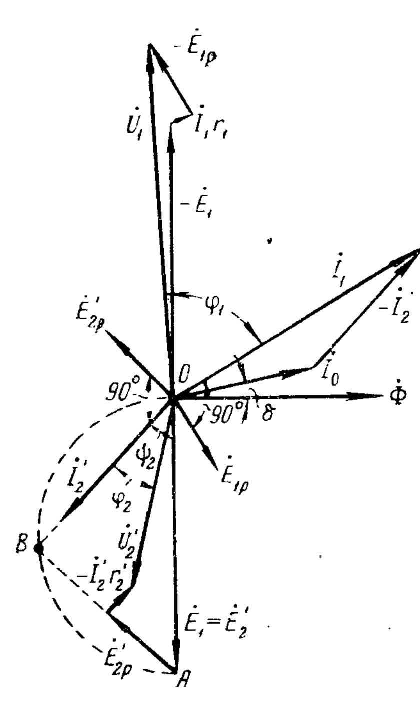



Рис. 95. Векторная диаграмма трансформатора при смешанной активно-индуктивной нагрузке

По условию нагрузка трансформатора имеет активно-индуктивный характер, поэтому вектор тока $\dot{I}'_2$ проводим под углом $\psi_2$ в сторону отставания от вектора э. д. с. $\dot{E}'_2$. Величину угла $\psi_2$ получаем следующим образом. На векторе $\dot{E}'_2 = \dot{E}_1$, как на диаметре, строим окружность. Затем из конца этого вектора радиусом $AB$, равным падению напряжения на индуктивном сопротивлении вторичной обмотки трансформатора и индуктивном сопротивлении нагрузки, делаем на окружности засечку. Угол между отрезками $OA$ и $OB$ есть угол $\psi_2$.

Э. д. с. рассеяния вторичной обмотки трансформатора $\dot{E}'_{2p}$ наводится за счет магнитного потока рассеяния $\Phi_{2p}$, который в свою очередь создается током нагрузки $\dot{I}'_2$. В связи с этим вектор э. д. с. $\dot{E}_{2p}$ откладываем под углом 90° к вектору тока $\dot{I}'_2$ в сторону отставания. После этого, руководствуясь уравнением равновесия э. д. с. для вторичной цепи

$$\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 + \dot{E}'_{2p} - \dot{I}'_2 r'_2,$$

производим геометрическое сложение соответствующих векторов и определяем величину вторичного напряжения трансформатора $\dot{U}_2'$. При этом учитываем, что вектор активного падения

напряжения во вторичной обмотке трансформатора $\dot{I}'_2 r'_2$ совпадает по направлению с вектором тока $\dot{I}'_2$.

Определив величину и направление вектора $\dot{U}'_2$, устанавливаем угол сдвига фаз $\varphi_2$ между током нагрузки $\dot{I}'_2$ и напряжением $\dot{U}_2'$. Затем, используя уравнение равновесия м. д. с.

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2,$$

определяем вектор тока первичной обмотки трансформатора

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_0 - \dot{I}'_2.$$

Далее, учитывая, что первичная э. д. с. рассеяния $\dot{E}_{1p}$ отстает от потока рассеяния $\Phi_{1p}$ и, следовательно, от тока $\dot{I}_1$ на угол 90°, проводим вектор э. д. с. $\dot{E}_{1p}$.

Чтобы построить вектор напряжения $\dot{U}_1$, используем уравнение равновесия э. д. с. первичной цепи трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1p} + \dot{I}_1 r_1.$$

Вектор активного падения напряжения в первичной обмотке трансформатора $\dot{I}_1 r_1$ откладываем параллельно вектору первичного тока $\dot{I}_1$.

Из полученной векторной диаграммы видно, что первичный ток трансформатора $\dot{I}_1$ отстает от первичного напряжения $\dot{U}_1$ на угол $\varphi_1$.

Аналогичным путем можно построить векторную диаграмму для активной и активно-емкостной нагрузки.

Векторная диаграмма трансформатора имеет практическое значение. Она дает возможность судить о том, как изменяются электрические характеристики трансформатора в зависимости от величины и характера нагрузки. Так, например, из построенной векторной диаграммы видно, что при увеличении индуктивности нагрузки, т. е. при увеличении угла $\varphi_2$ и неизменном $I_2$, несколько снижается напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора $U_2$, возрастает первичный ток $I_1$, увеличивается полная мощность $P_1 = U_1 I_1$, потребляемая трансформатором из сети, становится больше угол сдвига фаз между напряжением $U_1$ и током $I_1$ и, как результат этого, уменьшается коэффициент мощности $\cos\varphi_1$ первичной цепи трансформатора.

## § 60. КОРОТКОЕ ЗАМЫКАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Коротким замыканием называется такой режим, при котором первичная обмотка трансформатора приключена к питающей сети, а вторичная обмотка замкнута накоротко (рис. 96).

При коротком замыкании напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора $U_2$ равно нулю, поэтому наводимая в ней э. д. с. уравновешивается падением напряжения в обмотке.

Если короткое замыкание происходит внезапно в условиях эксплуатации, когда к первичным зажимам трансформатора приложено номинальное напряжение, то токи в его обмотках могут достигнуть чрезмерно больших значений и вызвать аварию трансформатора, если он своевременно не будет отключен защитой от сети.

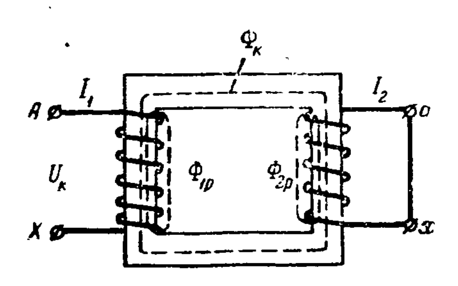



**Рис. 96. Принципиальная схема трансформатора при коротком замыкании**

Другим видом короткого замыкания, которое обычно осуществляется при испытании трансформаторов, является **опыт короткого замыкания**. При опыте короткого замыкания одна из обмоток трансформатора замыкается накоротко, а к другой подводится такое пониженное напряжение $U_к$, чтобы токи в обмотках трансформатора были бы равны номинальным значениям.

Напряжение $U_к$ называется **напряжением короткого замыкания**. Выражается оно обычно в процентах от номинального напряжения:

$$u_к = \frac{U_к}{U_н} 100.$$

Практика показывает, что в большинстве случаев у современных силовых трансформаторов $u_к$ составляет $5 - 10\% U_н$.

Так как напряжение, подводимое к трансформатору при опытном коротком замыкании, невелико, то мал будет и основной магнитный поток $\Phi_к$, замыкающийся по сердечнику трансформатора, а следовательно, и м. д. с. $F_0$, обеспечивающая создание этого потока. В связи с этим потерями в стали трансформатора можно пренебречь и считать, что мощность, потребляемая трансформатором из сети $P_1$, практически расходуется на потери в меди обмоток трансформатора:

$$P_1 = P_к = P_м.$$

Уравнение равновесия м. д. с. трансформатора в этом случае можно представить в следующем виде:

$$\dot{I}_0 w_1 = \dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 \approx 0$$

или

$$\dot{I}_1 w_1 \approx -\dot{I}_2 w_2.$$

Иначе говоря, при опытном коротком замыкании м. д. с. первичной обмотки трансформатора $F_1 = I_1 w_1$ практически расходуется на компенсацию размагничивающего действия м. д. с. вторичной обмотки $F_2 = I_2 w_2$.

Поскольку

$$I_1 w_1 \approx I_2 w_2,$$

то

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{w_1}{w_2} = k_m,$$

т. е. кроме потерь в меди $P_м$, при опыте короткого замыкания по отношению токов в обмотках трансформатора можно приближенно определить коэффициент трансформации.

## § 61. ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСФОРМАТОРА

Внешней характеристикой трансформатора называют зависимость вторичного напряжения $U_2$ от тока нагрузки $I_2$ при постоянном напряжении и частоте сети и неизменном коэффициенте мощности нагрузки:

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } U_1 = \text{const},$$
$$f = \text{const} \text{ и } \cos\varphi_2 = \text{const}.$$

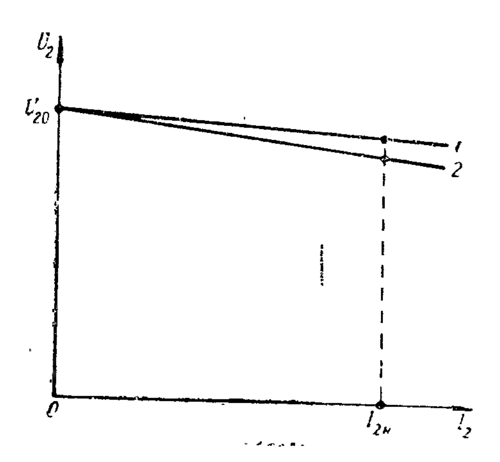



Рис. 97. Внешние характеристики трансформатора

С ростом тока нагрузки увеличивается падение напряжения во вторичной обмотке трансформатора и хотя незначительно, но уменьшаются э. д. с. $E_1$ и $E_2$ вследствие некоторого ослабления магнитного потока, создаваемого током нагрузки. Поэтому по мере увеличения тока $I_2$ напряжение на вторичных зажимах трансформатора снижается (кривая 1, рис. 97). Чем индуктивнее нагрузка, тем значительнее реактивная составляющая вторичного тока и, следовательно, сильнее ее размагничивающее действие на магнитный поток трансформатора. Вследствие этого при меньших $\cos\varphi_2$ кривая $U_2 = f(I_2)$ имеет более падающий характер (кривая 2).

По внешней характеристике трансформатора можно определить процентное изменение напряжения на его вторичных зажимах:

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_{2н}}{U_{2н}} 100,$$

где $U_{20}$ и $U_{2н}$ — вторичные напряжения трансформатора соответственно при холостом ходе и номинальной нагрузке.

У современных силовых трансформаторов $\Delta U$ обычно не превышает 8%.

## § 62. ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100,$$

где $P_2$ — полезная мощность, отдаваемая трансформатором;
$P_1$ — мощность, подводимая к трансформатору.

Определение к. п. д. трансформатора методом непосредственного измерения мощностей $P_2$ и $P_1$, с одной стороны, не отличается высокой точностью, а с другой — требует полной нагрузки трансформатора. Поэтому на практике к. п. д. трансформатора в большинстве случаев определяют расчетным путем на основании потерь, которые получают из опытов холостого хода и короткого замыкания. Из опыта холостого хода получают потери в стали трансформатора, а из опыта короткого замыкания — потери в меди. К. п. д. в этом случае подсчитывают по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_c + P_м} 100 = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + P_к} 100.$$

Зависимость к. п. д. трансформатора от тока нагрузки $\eta = f(I_2)$ имеет примерно такой же вид, как у электрических машин постоянного тока. При небольших нагрузках с увеличением тока $I_2$ к. п. д. трансформатора быстро растет, затем в довольно широких пределах изменения нагрузки почти не изменяется и, наконец, начинает убывать. Наибольшего значения к. п. д. достигает тогда, когда потери в меди трансформатора будут равны потерям в стали. Это обычно имеет место при нагрузке, равной 50—75% $P_{2н}$.

Современные трансформаторы имеют высокий коэффициент полезного действия. Например, у мощных наземных трансформаторов к. п. д. достигает 98—99%. У бортовых трансформаторов вследствие повышенных потерь в стали к. п. д. обычно находится в пределах $\eta = 85—95\%$.

## § 63. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Рассмотренная выше теория работы однофазного трансформатора справедлива и для трехфазного трансформатора, если относить все к одной фазе. Однако трехфазный трансформатор обладает и рядом особенностей, обусловленных характером магнитной системы и соединением его обмоток.

Трехфазный стержневой трансформатор (см. рис. 92) имеет несимметричную магнитную систему, так как длина магнитных путей для потоков двух крайних фаз будет больше длины магнитного пути для потока средней фазы. Поэтому при холостом ходе, несмотря на симметричное питающее напряжение, токи в фазах не будут одинаковы: в крайних фазах они будут больше, чем в средней фазе. За ток холостого хода трехфазного трансформатора в связи с этим принимают среднее арифметическое значение токов трех фаз. При нагрузке асимметрия токов в фазах почти не будет заметна, поскольку ток холостого хода трансформатора мал.

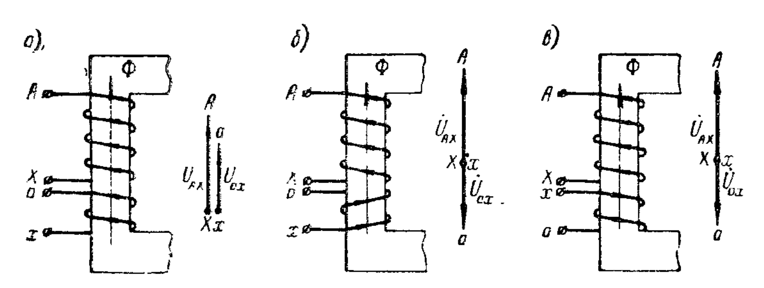


Рис. 98. Угол сдвига между векторами э. д. с., наводимыми в первичной и вторичной обмотках трансформатора, в зависимости от направления намотки и обозначения зажимов

Фазы обмотки высокого напряжения принято обозначать *AX*, *BY*, *CZ*, а фазы обмотки низкого напряжения — *ax*, *by*, *cz*. При этом буквами *A*, *B*, *C* и *a*, *b*, *c* обозначают начала фаз, а буквами *X*, *Y*, *Z* и *x*, *y*, *z* — концы фаз. Вывод нулевой точки обозначают буквами *O* или *o*.

Первичные и вторичные обмотки трехфазных трансформаторов обычно соединяют звездой или треугольником. Соединение обмоток звездой обозначают знаком Y, а соединение треугольником знаком △. Схема соединения указывается на заводском щитке вместе с номинальными данными трансформатора, причем сначала указывается схема соединения обмотки ВН, а затем обмотки НН, например, Y/Y или Y/△. Если при соединении звездой выводится нулевая точка, то применяется знак $Y_0$.

Кроме номинальных данных и схемы соединения обмоток, на заводском щитке указывается и так называемая группа, к которой принадлежит трансформатор. Группа трансформатора определяется углом сдвига $\alpha$ между первичным и вторичным одноименными линейными напряжениями.

Предположим, что на стержне в одном и том же направлении намотаны две обмотки (рис. 98,*a*). Так как эти обмотки пронизываются одним и тем же магнитным потоком, в них индуктируются э. д. с., имеющие в любой момент времени одинаковые направления относительно зажимов, например от конца к началу. Следовательно, напряжения первичной $\dot{U}_{AX} = AX$ и вторич-

ной $\dot{U}_{ax} = ax$ обмоток в этом случае будут совпадать по фазе. Если вторичная обмотка намотана в противоположном направлении (рис. 98,*б*), напряжения $\dot{U}_{AX}$ и $\dot{U}_{ax}$ будут находиться в противофазе. Такой же результат будет, если, сохранив одинаковое направление намотки, у вторичной обмотки изменить обозначение зажимов (рис. 98,*в*).

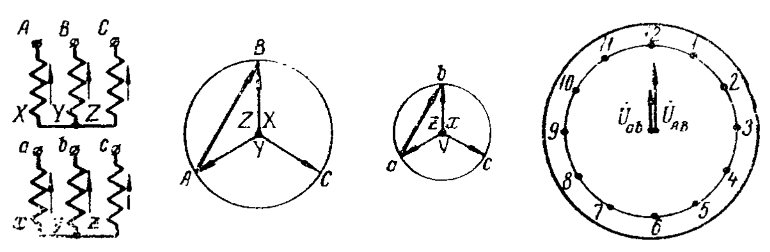



Рис. 99. Соединение Y/Y-12

Таким образом, угол сдвига между фазными напряжениями трансформатора $\dot{U}_{AX}$ и $\dot{U}_{ax}$ зависит от направления намотки обмоток и способа обозначения зажимов. Угол сдвига между линейными напряжениями трехфазного трансформатора будет зависеть еще и от схемы соединения обмоток.

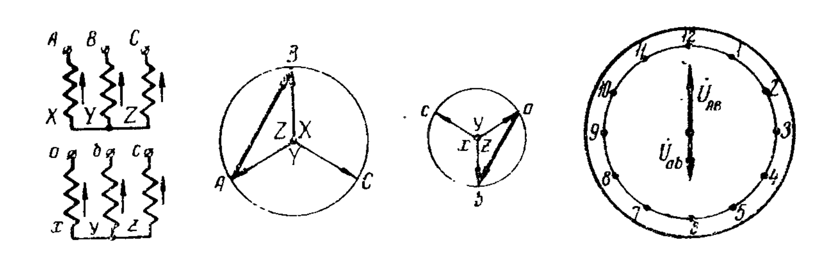



Рис. 100. Соединение Y/Y-6

Пусть первичная и вторичная обмотки трехфазного трансформатора соединены звездой. Тогда при одинаковом направлении намотки и одинаковом обозначении зажимов звезда векторов вторичных фазных напряжений *ax*, *by* и *cz* будет совпадать по фазе со звездой векторов первичных фазных напряжений *AX*, *BY* и *CZ* (рис. 99). Следовательно, угол $\alpha$ между линейными напряжениями $\dot{U}_{AB} = AB$ и $\dot{U}_{ab} = ab$ будет равен нулю.

На практике для определения групп трансформаторов используется часовой метод. Для этого вектор первичного напряжения $\dot{U}_{AB}$ принимают за минутную стрелку часов и устанавливают на цифре 12, а вектор вторичного напряжения $\dot{U}_{ab}$ принимают за часовую стрелку и располагают на циферблате так,

чтобы взаимное расположение стрелок соответствовало расположению векторов $\dot{U}_{AB}$ и $\dot{U}_{ab}$. Так как при соединении обмоток по схеме звезда — звезда векторы линейных напряжений $\dot{U}_{AB}$ и $\dot{U}_{ab}$ будут направлены в сторону цифры 12, группа трансформатора обозначается Y/Y-12.

В случае изменения направления намотки вторичной обмотки трансформатора звезда напряжений *ax*, *by*, *cz* повернется относительно звезды напряжений *AX*, *BY*, *CZ* на угол 180° (рис. 100). В результате этого вектор линейного напряжения $\dot{U}_{ab}$ будет направлен в сторону цифры 6 циферблата, т. е. группа трансформатора будет Y/Y-6.

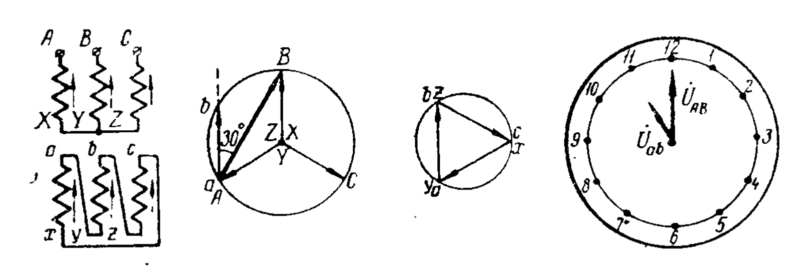



Рис. 101. Соединение Y/△-11

Если первичную обмотку трансформатора соединить звездой, а вторичную треугольником, то, как это видно из построения, группа соединения у трансформатора будет Y/△-11 (рис. 101).

В зависимости от схемы соединения обмоток можно получить различные группы трансформаторов, однако применение получили группы Y/Y-12, Y/△-11 и $Y_0$/△-11. На летательных аппаратах при выполнении трехпроводной сети обычно применяются трехфазные трансформаторы группы $Y_0$/△-11.

У однофазных трансформаторов угол между первичным и вторичным напряжениями либо может быть равен нулю, если векторы $\dot{U}_{AX}$ и $\dot{U}_{ax}$ совпадают по фазе, либо равен 180°, если эти векторы находятся в противофазе. Поэтому у них по аналогии с трехфазными трансформаторами можно различать две группы — 12 и 6.

Знание групп имеет большое значение при включении трансформаторов на параллельную работу.

## § 64. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Параллельной работой называют совместную работу трансформаторов на общую нагрузку. При параллельной работе первичные обмотки трансформаторов приключаются к питающей сети, а вторичные обмотки присоединяются к общим шинам вторичной цепи (рис. 102). Параллельная работа трансформаторов

дает возможность обеспечить бесперебойное снабжение электрической энергией потребителей и позволяет лучше использовать установленную мощность трансформаторов.

Для включения трансформаторов на параллельную работу необходимо соблюдать следующие основные условия:

а) номинальные первичные и вторичные напряжения трансформаторов должны быть соответственно равны:

$$U_{11} = U_{12} \text{ и } U_{21} = U_{22},$$

т. е. трансформаторы должны иметь одинаковые коэффициенты трансформации:

$$k_{m1} = k_{m2};$$

б) вторичные напряжения трансформаторов друг относительно друга (при обходе по контуру $a_1a_2x_2x_1$) должны находиться в противофазе. Иначе говоря, включаемые на параллельную работу трансформаторы должны принадлежать к одной группе.

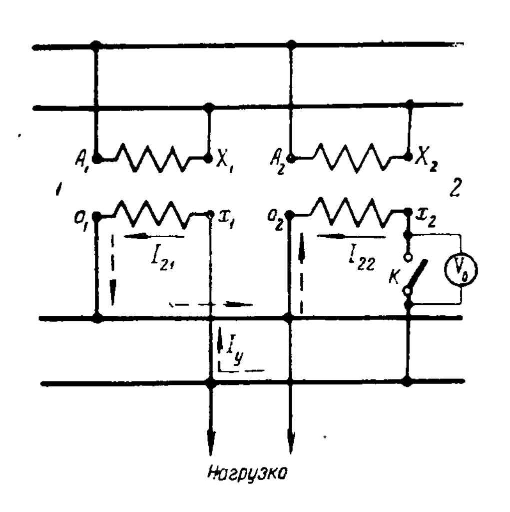



Рис. 102. Схема параллельной работы однофазных трансформаторов

В случае несоблюдения одного из условий между вторичными обмотками трансформаторов будет существовать разность напряжений $\Delta U_2$, которая при параллельном включении трансформаторов вызовет уравнительный ток $I_y$. Этот ток, протекая в контуре, образованном вторичными обмотками трансформатора, и геометрически складываясь с током нагрузки, будет перегружать один трансформатор и недогружать другой, создавая этим самым неблагоприятные условия для их работы. Поэтому на параллельную работу разрешается включать только такие трансформаторы, у которых коэффициенты трансформации отличаются не более чем на 0,5%, а включение на параллельную работу трансформаторов разных групп вообще не допускается.

Убедиться в соблюдении указанных выше условий параллельного включения у однофазных трансформаторов можно с помощью вольтметра, включенного так, как указано на схеме (рис. 102). При выполнении обоих условий показания вольтметра должны быть равны нулю.

При параллельной работе нагрузка между трансформаторами должна распределяться пропорционально их номинальной мощности. Это позволяет полнее использовать установленную мощность трансформаторов. Если параллельно включены трансформаторы равной мощности, то нагрузка между ними должна распределяться поровну.

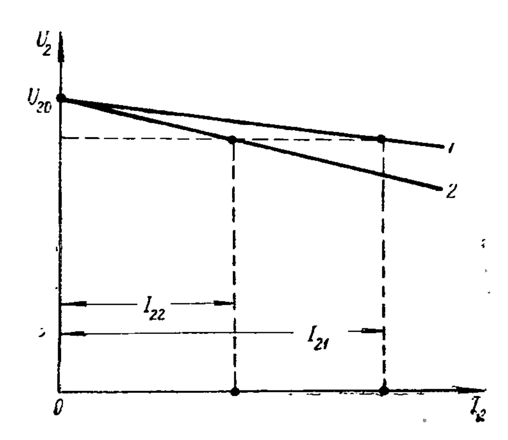



Рис. 103. Распределение нагрузки между параллельно работающими трансформаторами

Распределение нагрузки между трансформаторами равной мощности зависит от наклона их внешних характеристик. Чем положе внешняя характеристика, тем большую нагрузку принимает на себя трансформатор (рис. 103). Трансформаторы равной мощности, имеющие одинаковые внешние характеристики, нагружаются равномерно.

## § 65. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

**Автотрансформатором** называется такой трансформатор с одной обмоткой, которая одновременно принадлежит первичной и вторичной цепям. Автотрансформаторы могут быть повышающими и понижающими.

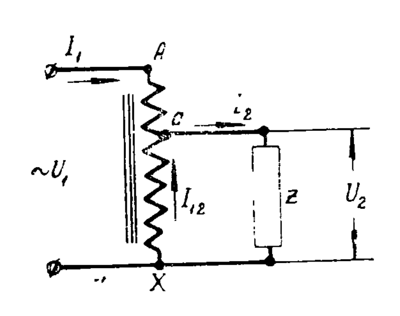



Рис. 104. Схема понижающего автотрансформатора

Принципиальная схема понижающего автотрансформатора изображена на рис. 104. Здесь первичная обмотка автотрансформатора $AX$ имеет $w_1$ витков; вторичная обмотка $aX$ является частью первичной и включает в себя $w_2$ витков. Таким образом, в автотрансформаторе между вторичной и первичной цепями существует не только магнитная, но и электрическая связь.

Отношение э. д. с. $E_1$, наводимой в витках $w_1$ всей обмотки, к э. д. с. $E_2$, наводимой в витках $w_2$, определяет коэффициент трансформации автотрансформатора:

$$k_m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}.$$

Если в автотрансформаторе пренебречь потерями, то мощность, отдаваемая им во внешнюю цепь,

$$P_2 = U_2I_2 = U_1I_1,$$

откуда

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = k_m.$$

При включении нагрузки во вторичной цепи автотрансформатора появляется ток $I_2$. Если током холостого хода $I_0$ пренебречь, то ток $I_2$ будет находиться в противофазе с первичным током $I_1$, поэтому результирующий ток $I_{12}$ на участке $aX$ будет равен:

$$I_{12} = I_2 - I_1,$$

откуда

$$I_2 = I_1 + I_{12}.$$

Если умножить левую и правую части этого уравнения на $U_2$, то получим

$$U_2I_2 = U_2I_1 + U_2I_{12} = U_2I_1 + U_2(I_2 - I_1)$$

или

$$P_2 = \frac{U_2I_2}{k_m} + U_2I_2\left(1 - \frac{1}{k_m}\right) = P_{эл} + P_{эм},$$

т. е. мощность $P_2$, передаваемая автотрансформатором из первичной цепи во вторичную, состоит из двух слагаемых. Первое слагаемое $P_{эл}$ представляет собой мощность, которая передается из первичной цепи во вторичную цепь электрическим путем, за счет электрической связи между цепями. Второе слагаемое $P_{эм}$ есть мощность, передаваемая из первичной цепи во вторичную цепь трансформаторным путем, т. е. за счет электромагнитной связи этих цепей.

Поскольку в автотрансформаторе электромагнитным путем передается только часть мощности, для него требуется магнитопровод меньших размеров, чем для трансформатора. Кроме того, та часть обмотки автотрансформатора $aX$, где протекает ток $I_{12} = I_2 - I_1$, может быть выполнена обмоточным проводом меньшего сечения, чем остальная обмотка. В связи с этим у автотрансформатора несколько меньше расход обмоточной меди, чем у трансформатора, меньше вес и габариты, а также меньше потери и выше к. п. д.

Из приведенного выше уравнения мощностей видно, что соотношение между электрической $P_{эл}$ и электромагнитной $P_{эм}$ мощностями зависит от коэффициента трансформации автотрансформатора. При увеличении коэффициента трансформации мощность $P_{эл}$ уменьшается, а мощность $P_{эм}$ возрастает. Поэтому обычно коэффициент трансформации у автотрансформаторов не превышает $k_m = 2$, так как в противном случае теряются их преимущества по сравнению с трансформаторами.

## § 66. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Измерительные трансформаторы применяются для расширения пределов измерения электроизмерительных приборов. Они дают возможность производить измерения электрических величин в мощных и высоковольтных цепях переменного тока с помощью обычных электроизмерительных приборов. Кроме того, измерительные трансформаторы позволяют изолировать электроизмерительные приборы от цепей высокого напряжения и этим обеспечить большую безопасность для обслуживающего персонала.

Измерительные трансформаторы подразделяются на трансформаторы напряжения и трансформаторы тока.

Трансформаторы напряжения включаются в сеть так же, как силовые трансформаторы (рис. 105, *а*). Сопротивление вольтметров и цепей напряжения ваттметров, счетчиков и фазометров велико и трансформаторы напряжения работают в режиме, близком к холостому ходу. При работе вхолостую в трансформаторе, как известно, имеет место постоянное соотношение между первичным и вторичным напряжениями, равное коэффициенту трансформации $k_m$. Следовательно, величина измеряемого напряжения будет:

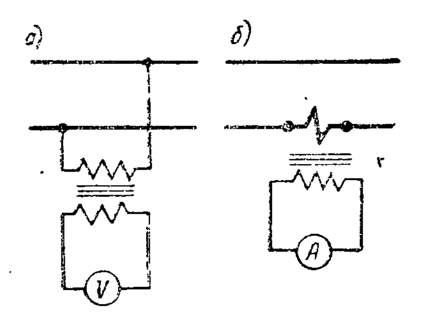


Рис. 105. Схемы включения измерительных трансформаторов:
а) трансформатор напряжения;
б) трансформатор тока

$$U = k_m U_V,$$

где $U_V$ — напряжение на зажимах вольтметра.

Трансформаторы напряжения, как правило, применяются при напряжениях свыше 250 *в*. Шкала вольтметра обычно градуируется непосредственно на измеряемое напряжение. К одному трансформатору напряжения можно приключить параллельно несколько электроизмерительных приборов.

Трансформаторы тока обычно используются для подключения электроизмерительных приборов к сети, если ток ее превышает несколько десятков ампер. Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно в линию, по которой протекает измеряемый ток, а к зажимам вторичной присоединяются амперметры и токовые цепи ваттметров, счетчиков и фазометров (рис. 105, *б*). Вторичные обмотки трансформаторов тока обычно рассчитываются на номинальный ток, равный 5 *а*. Сопротивление амперметров и цепей тока ваттметров, счетчиков и фазометров мало и трансформаторы тока работают в режиме, близком к короткому замыканию. В этом случае измеряемый ток равен:

$$I = k_m I_A,$$

где $k_m$ — коэффициент трансформации трансформатора тока;

$I_A$ — ток, измеряемый амперметром.

Шкала амперметра обычно градуируется непосредственно в значениях тока нагрузки. К одному трансформатору тока можно приключить одновременно несколько измерительных приборов, например амперметр и токовые цепи ваттметра и фазометра. Все приборы между собой включаются последовательно, причем их общее сопротивление не должно превышать величины, установленной для трансформатора тока заводом.

При работе с трансформатором тока ни в коем случае нельзя размыкать его вторичную цепь. Объясняется это тем, что при разомкнутой вторичной цепи размагничивающее действие м. д. с. вторичной обмотки трансформатора исчезает и резко возрастают магнитный поток и э. д. с. $E_2$. Величина $E_2$ может оказаться не только достаточной для пробоя изоляции трансформатора, но и опасной для жизни обслуживающего персонала.

## § 67. МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Работа магнитного усилителя основана на изменении индуктивного сопротивления катушки со стальным сердечником при подмагничивании его постоянным током.

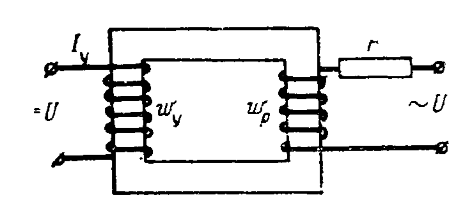


Рис. 106. Схема магнитного усилителя

Простейший магнитный усилитель представляет собой сердечник, на котором уложены две обмотки — рабочая $w_р$ и управляющая $w_у$ (рис. 106). Рабочая обмотка включается в цепь переменного тока. Последовательно с ней включается нагрузка $r$. Обмотка управления питается от источника постоянного тока.

Ток нагрузки магнитного усилителя равен:

$$I = \frac{U}{\sqrt{(r_р + r)^2 + x_р^2}} = \frac{U}{\sqrt{(r_р + r)^2 + (\omega L_р)^2}},$$

где $U$ — напряжение сети переменного тока;

$r_р$ — активное сопротивление рабочей обмотки;

$x_р = \omega L_р$ — индуктивное сопротивление рабочей обмотки.

Индуктивность $L_р$ рабочей обмотки пропорциональна магнитной проницаемости сердечника.

При увеличении тока управления $I_у$ сталь сердечника магнитного усилителя насыщается и магнитная проницаемость его снижается. Это приводит к росту тока $I$ в рабочей цепи усилителя и, следовательно, к росту мощности переменного тока $P$ на сопротивлении нагрузки. Поскольку мощность $P$ во много раз пре-

вышает мощность управления $P_у$, рассматриваемое устройство представляет собой магнитный усилитель мощности с коэффициентом усиления

$$k_у = \frac{P}{P_у}.$$

Коэффициент мощности у современных магнитных усилителей достигает $k_у = 10^3 \div 10^6$.

Магнитные усилители надежно работают в условиях вибраций и тряски и допускают значительные перегрузки. Они отличаются высокой стабильностью характеристик, большим сроком службы и более высоким коэффициентом полезного действия, чем, например, электронные усилители. Эти достоинства обусловили их широкое применение в различных автоматических системах регулирования и управления.

---

*ГЛАВА VIII*

# АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

## § 68. УСТРОЙСТВО ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Статор трехфазного асинхронного двигателя представляет собой полый цилиндрической формы пакет, набранный из отдельных изолированных друг от друга листов электротехнической стали, который запрессовывается в алюминиевый или стальной корпус (рис. 107, *а*). В его пазы укладывается трехфазная обмотка, которая соединяется обычно звездой. Для статоров асинхронных двигателей применяются такие же типы обмоток, как для статоров синхронных машин. Подробно эти обмотки излагаются в следующей главе.

Сердечник ротора собирается из отдельных листов электротехнической стали и напрессовывается на вал. В пазы его закладываются медные или чаще латунные стержни, концы которых с обеих сторон ротора привариваются к медным или латунным кольцам. Полученная таким образом короткозамкнутая обмотка называется б е л и ч ь е й  к л е т к о й (рис. 107, *б*).

Кроме асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, электропромышленностью выпускаются асинхронные двигатели с фазным ротором, у которых на роторе вместо беличьей клетки выполняется трехфазная обмотка, подобная обмотке статора, имеющая такое же число полюсов. Обмотка ротора соединяется звездой и концы ее приключаются к кольцам, на которых размещаются щетки. Через кольца и щетки обмотка ротора соединяется с пусковым реостатом $R_п$ (рис. 108).

Рис. 107. Устройство **трехфазного** асинхронного двигателя с **короткозамкнутым ротором:**
***1*—статор**; *2*—корпус; ***3*—подшипниковый** щит; *4*—ротор; *5*—вал; ***6*** и *7*—шарикоподшипники; *8*—фланец; ***9***—уплотнение; ***10***—гайка; *11*—стопорная шайба

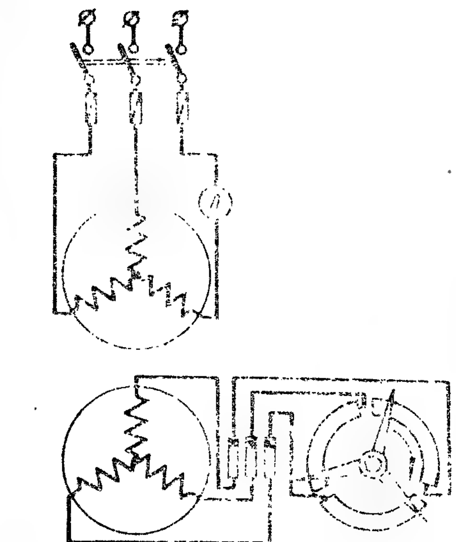


Рис. 108. Схема соединения обмотки ротора с пусковым реостатом

*Таблица 5*

| Тип двигателя | АДС-35000 | АДС-3000Т | АДС-2500 | АДС-1500Т | АДС-1500М | МТ-350-4 | АДС-200Т | МТ-200-4 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Номинальная мощность, *вт* . . | 35000 | 3400 | 2500 | 1500 | 1400 | 350 | 210 | 200 |
| Номинальное напряжение, *в* . . . | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Частота, *гц* . . | 400 | 400 | 500 | 400 | 500 | 400 | 400 | 400 |
| Потребляемый ток, *а* . . . . . . | 163 | 18,0 | 11,5 | 10,0 | 7,5 | 1,82 | 2,3 | 1,34 |
| Номинальный момент на валу, *кгсм* . . . . . . | 756 | 30,0 | 18,0 | 14,0 | 20,0 | 3,0 | 1,9 | 3,5 |
| Скорость вращения (синхронная), *об/мин* . . . | 4800 | 12000 | 15000 | 12000 | 7500 | 12000 | 12000 | 6000 |
| Скольжение, % | 6,2 | 10,0 | — | 10,0 | 10,0 | 7,5 | 10,0 | 8,5 |
| Коэффициент мощности . . . . | 0,7 | 0,7 | 0,8 | — | 0,7 | 0,7 | — | 0,65 |
| Режим работы | Кр | ПКр | Пр | ПКр | Кр | Пр | ПКр | Пр |
| Вес не более, *кг* . . . . . . . | 38,0 | 10,5 | 9,1 | 7,0 | 6,5 | 1,2 | — | 1,4 |

Примечание. Режимы работы: Кр — кратковременный; ПКр — повторно-кратковременный; Пр — продолжительный.

Асинхронные двигатели с фазным ротором дороже и сложнее в изготовлении, чем двигатели с короткозамкнутым ротором, однако они обладают лучшими пусковыми свойствами. Выполняются эти двигатели обычно на большие мощности и применяются в различных наземных установках.

Рассмотренные нами два основных типа трехфазных асинхронных двигателей были разработаны еще в 90-х годах прошлого столетия русским ученым М. О. Доливо-Добровольским.

В таблице 5 приведены основные номинальные данные некоторых серийных бортовых трехфазных асинхронных двигателей.

## § 69. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Предположим, что в пазах статора под углом 120° друг к другу размещены три катушки (фазы), которые соединены между собой

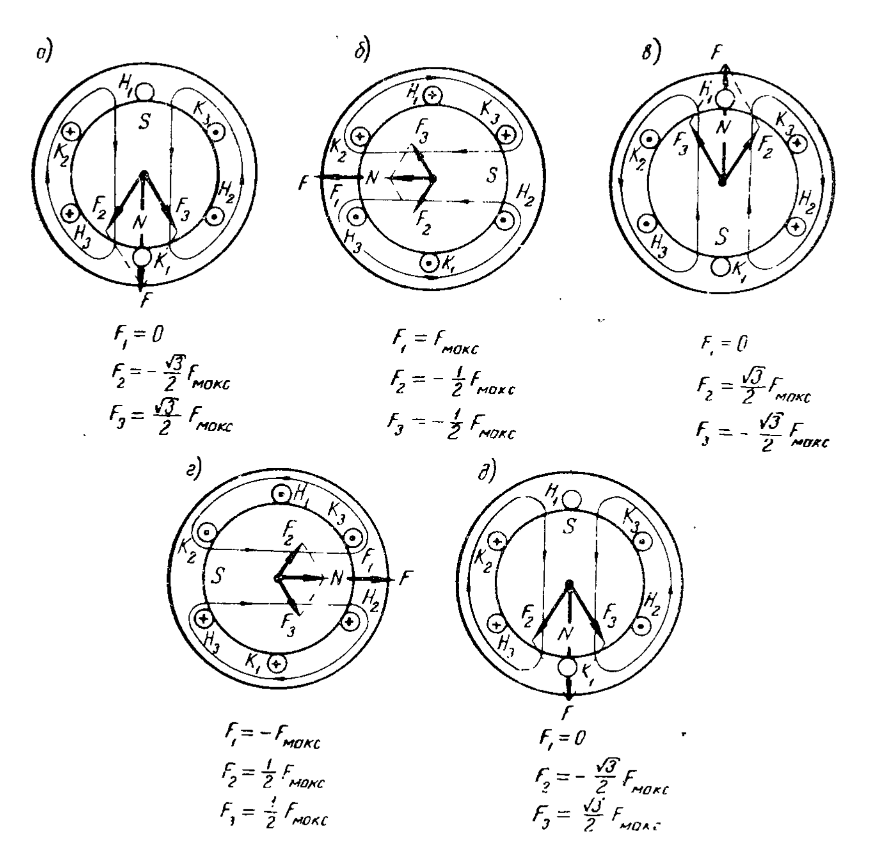



Рис. 109. Двухполюсное вращающееся магнитное поле трехфазного тока

звездой или треугольником и питаются трехфазным переменным током (рис. 109). Кривые изменения фазных токов во времени изо-

бражены на рис. 110. Угол сдвига между амплитудными значениями этих токов равен 120°, т. е.

$$i_1 = I_{макс} \sin \omega t, \quad i_2 = I_{макс} \sin(\omega t - 120°), \quad i_3 = I_{макс} \sin(\omega t - 240°).$$

Чтобы выяснить, как изменяется результирующее магнитное поле, создаваемое трехфазным током, рассмотрим это поле на протяжении периода в различные моменты времени, например *а, б, в, г* и *д*, которые отстоят друг от друга на 1/4 периода. При этом условимся, что в случае положительного значения ток в фазе протекает от начала к концу, а при отрицательном значении — от конца к началу.

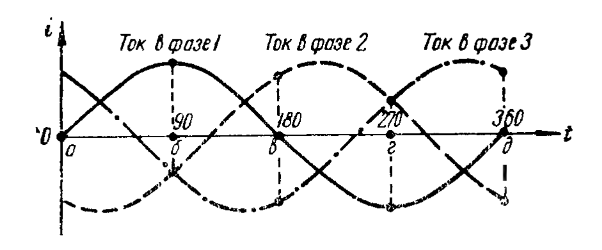



Рис. 110. Кривые изменения фазных токов во времени

В момент *а* ток в фазе 1 отсутствует ($i_1 = 0$). Ток в фазе 2 равен $i_2 = I_{макс} \sin(\omega t - 120°) = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_{макс}$; так как он отрицателен, у начала фазы ставим точку, а у конца плюс. Ток в фазе 3 равен $i_3 = I_{макс} \sin(\omega t - 240°) = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{макс}$, следовательно, у начала этой фазы должен быть плюс, а у конца точка. Если теперь воспользоваться правилом буравчика, то можно определить направление магнитных линий полей, создаваемых токами, и построить результирующее магнитное поле. Как видно из рис. 109,*а*, результирующее магнитное поле имеет два полюса и в данный момент времени расположено в пространстве вертикально.

Через четверть периода в момент *б* в фазе 1 будет протекать ток $i_1 = I_{макс}$, фаза 2 будет обтекаться током $i_2 = -\frac{1}{2} I_{макс}$, а в фазе 3 ток будет $i_3 = -\frac{1}{2} I_{макс}$. Результирующее магнитное поле для этого момента времени в пространстве будет располагаться горизонтально (рис. 109,*б*). Аналогичным путем получаем результирующие магнитные поля и для остальных выбранных моментов времени.

Из проведенного построения видно, что результирующее магнитное поле, создаваемое трехфазным током, постоянно и вра-

щается в данном случае по часовой стрелке, совершая за период изменения тока один полный оборот.

Рассмотрим теперь, чему равна результирующая м. д. с. трехфазной обмотки. Так как обмотка питается трехфазным переменным током, токи фаз $i_1$, $i_2$ и $i_3$ создают соответственно м. д. с.

$$F_1 = F_{макс} \sin \omega t, \quad F_2 = F_{макс} \sin (\omega t - 120°),$$
$$F_3 = F_{макс} \sin (\omega t - 240°).$$

Если бы фазы занимали одинаковое положение в пространстве, то результирующая м. д. с.

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = F_{макс} \sin \omega t + F_{макс} \sin (\omega t - 120°) + F_{макс} \sin (\omega t - 240°) = 0.$$

В рассматриваемом нами случае фазы расположены на статоре под углом 120° друг относительно друга, поэтому результирующая м. д. с. $F$ в каждый момент времени будет равна геометрической сумме м. д. с. фаз:

$$\dot{F} = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 + \dot{F}_3.$$

На рис. 109 показаны векторы м. д. с. фаз и произведено геометрическое сложение этих векторов с целью определения результирующей м. д. с. $\dot{F}$. При этом учитывается, что вектор м. д. с. каждой фазы совпадает с ее осью.

Из рис. 109 видно, что сумма м. д. с. трехфазной обмотки $F$ в любой момент времени постоянна и равна 3/2 амплитудного значения пульсирующей однофазной м. д. с.:

$$F = \frac{3}{2} F_{макс}.$$

Вектор результирующей м. д. с. $\dot{F}$ вращается с постоянной скоростью, причем в пространстве направление этого вектора совпадает с осью той фазы, в которой в данный момент времени ток имеет максимальное значение.

Выясним, какие факторы определяют скорость вращения магнитного поля.

В рассмотренном выше случае мы имели двухполюсное магнитное поле, которое совершало полный оборот в течение периода изменения тока. При такой скорости вращения поле имело $f_1$ оборотов в секунду или $n_1 = 60 f_1$ оборотов в минуту, где $f_1$ — частота тока, протекающего по обмотке.

Если каждую фазу выполнить из двух последовательно соединенных катушек, оси которых смещены в пространстве друг относительно друга на 90°, то результирующее магнитное поле будет четырехполюсным (рис. 111). На рисунке показано соединение катушек только первой фазы. При изменении направления тока в фазах на обратное, что происходит по истечении половины перио-

да, магнитное поле поворачивается на 1/4 оборота. Следовательно, за полный период изменения тока поле сделает 1/2 оборота.

Таким образом, при одинаковой частоте питающего тока $f_1$ четырехполюсное магнитное поле имеет в два раза меньшую скорость вращения, чем двухполюсное, т. е. $n_1 = \frac{60f_1}{2}$ оборотов в минуту. В общем случае при наличии $p$ пар полюсов скорость вращения магнитного поля будет:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

*Таблица 6*

| При $f_1 = 50$ *гц* | | При $f_1 = 400$ *гц* | |
|---|---|---|---|
| $p$ | $n_1$ *об/мин* | $p$ | $n_1$ *об/мин* |
| 1 | 3000 | 1 | 24000 |
| 2 | 1500 | 2 | 12000 |
| 3 | 1000 | 3 | 8000 |
| 4 | 750 | 4 | 6000 |
| 5 | 600 | 5 | 4800 |
| 6 | 500 | 6 | 4000 |

В таблице 6 приведены скорости вращения магнитного поля при частотах питающего тока $f_1 = 50$ *гц* и $f_1 = 400$ *гц* и различном числе пар полюсов.

Так как ось результирующего магнитного поля всегда совпадает с осью той фазы, в которой в данный момент времени ток имеет максимальное значение, направление вращения магнитного поля определяется порядком следования (чередования) фаз. В рассмотренном нами случае (см. рис. 109) порядок следования фаз $1 \to 2 \to 3$ был по часовой стрелке, поэтому в этом же направлении вращалось и магнитное поле.

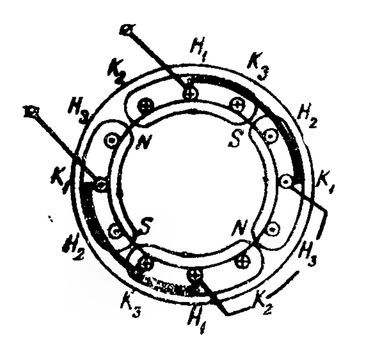
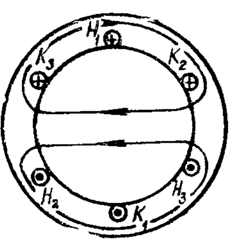


Рис. 111. Четырехполюсное вращающееся магнитное поле трехфазного тока



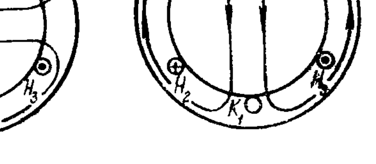


Рис. 112. Изменение направления вращения магнитного поля

При изменении порядка следования фаз на обратный $(1 \to 3 \to 2)$ магнитное поле будет вращаться в противоположную сторону, т. е. против часовой стрелки. В этом нетрудно убедиться,

если сравнить рис. 112 с рис. 109, *б* и *в*. Для изменения порядка следования фаз достаточно поменять местами два любых линейных провода, подводящих питание к статору от источника трехфазного тока.

## § 70. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

При подключении обмотки статора к источнику трехфазного тока внутри статора возникает вращающееся магнитное поле, которое будет наводить в проводниках обмотки ротора э. д. с. (рис. 113). Направление этих э. д. с. можно легко определить, воспользовавшись правилом правой руки. Если обмотка ротора будет замкнута, в ней появится электрический ток. В результате взаимодействия этого тока с вращающимся магнитным потоком возникнут электромагнитные силы $f_{эм}$, направление которых можно определить по правилу левой руки. Под действием этих сил ротор придет во вращение в направлении движения магнитного поля.

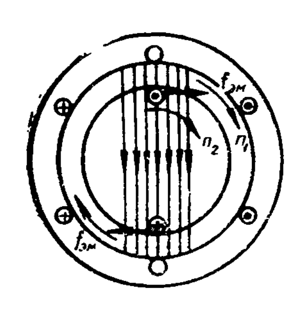



Рис. 113. Принцип действия трехфазного асинхронного двигателя

По мере того как скорость вра́щения ротора будет увеличиваться, скорость поля относительно ротора будет уменьшаться. Вследствие этого будут уменьшаться э. д. с. и ток ротора, а значит, и вращающий момент двигателя. Пуск двигателя закончится тогда, когда его вращающий момент достигнет величины тормозного момента на валу двигателя. После этого ускорение прекратится и у двигателя установится определенная скорость вращения, которая, как это следует из принципа его работы, всегда будет меньше скорости вращения магнитного поля. Поскольку скорость вращения ротора всегда отличается от скорости вращения магнитного поля, т. е. ротор вращается не синхронно с полем, такие двигатели называются **асинхронными**.

Если скорость вращения магнитного поля, которую обычно называют **синхронной скоростью**, обозначить $n_1$, а скорость вращения ротора $n_2$, то скорость, с которой магнитное поле вращается относительно ротора $n_s = n_1 - n_2$, представляет собой **скорость скольжения**.

Отношение скорости скольжения к синхронной скорости называют **скольжением**:

$$s = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{или} \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100.$$

В момент пуска, когда ротор двигателя неподвижен ($n_2 = 0$), а магнитное поле вращается относительно ротора с синхронной скоростью $n_1$, скольжение $s = 1$ или 100%. При холостом ходе, когда тормозной момент на валу двигателя равен нулю, двигатель имеет скорость вращения, близкую к синхронной, и скольжение его обычно не превышает 0,5%. В режиме номинальной нагрузки скольжение обычно равно: у бортовых трехфазных асинхронных двигателей $s = 5 \div 10\%$, а у наземных трехфазных асинхронных двигателей $s = 3 \div 8\%$.

Из формулы скольжения можно получить выражение для скорости вращения ротора асинхронного двигателя:

$$n_2 = n_1(1 - s).$$

## § 71. ЯВЛЕНИЯ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРИ НЕПОДВИЖНОМ РОТОРЕ

В асинхронном двигателе передача энергии из статора в ротор осуществляется электромагнитным путем. Поэтому при неподвижном роторе асинхронный двигатель можно рассматривать как трансформатор, который отличается от обычного трансформатора воздушным зазором и наличием на статоре и роторе распределенных обмоток. Благодаря воздушному зазору магнитная цепь асинхронного двигателя обладает значительным магнитным сопротивлением, поэтому он имеет бо́льший, чем у трансформатора, ток холостого хода, который у маломощных двигателей достигает 50—65% номинального тока.

Режим заторможенного ротора асинхронного двигателя соответствует моменту пуска двигателя в ход. Если при заторможенном роторе к обмотке статора асинхронного двигателя подвести трехфазный переменный ток, то возникнет вращающийся магнитный поток, который будет наводить в обмотках статора и ротора э. д. с. Действующие значения этих э. д. с. будут соответственно равны:

$$E_1 = 4{,}44 w_1 k_{об1} f_1 \Phi \quad \text{и} \quad E_2 = 4{,}44 w_2 k_{об2} f_1 \Phi,$$

где $k_{об1}$ и $k_{об2}$ — обмоточные коэффициенты статора и ротора, которые учитывают уменьшение э. д. с. вследствие распределения обмотки по пазам и применения укороченного шага (см. § 84); для ротора с обмоткой в виде беличьей клетки $k_{об2} = 1$;

$w_1$ и $w_2$ — число витков в фазах обмотки статора и обмотки ротора;

$f_1 = \frac{pn_1}{60}$ — частота тока, питающего обмотку статора;

$\Phi$ — полезный магнитный поток.

Кроме э. д. с. $E_1$, в обмотке статора асинхронного двигателя будет индуктироваться э. д. с. $E_{1p}$, обусловленная потоком рас-

сеяния $\Phi_{1p}$. Поскольку этот поток замыкается в основном через воздух, его величина будет пропорциональна току статора $I_1$ и, следовательно, э. д. с. $E_{1p}=x_1I_1$, где $x_1$ — индуктивное сопротивление фазы обмотки статора.

Согласно 2-му закону Кирхгофа для цепи статора справедливо следующее уравнение равновесия э. д. с.:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{1p} + \dot{I}_1 r_1 .$$

Здесь $r_1$ — активное сопротивление фазы обмотки статора.

Полное сопротивление фазы обмотки статора

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} .$$

Э. д. с. $E_2$ в короткозамкнутой обмотке заторможенного ротора вызывает ток $I_2$. Величину этого тока можно определить из формулы закона Ома:

$$I_2 = \frac{E_2}{z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}},$$

где $z_2$ — полное сопротивление фазы заторможенного ротора, которое включает в себя активное $r_2$ и индуктивное $x_2$ сопротивления фазы. Индуктивное сопротивление фазы заторможенного ротора, в свою очередь, равно:

$$x_2 = \omega_1 L_2 = 2\pi f_1 L_2,$$

где $L_2$ — индуктивность обмотки ротора.

## § 72. ЯВЛЕНИЯ В АСИНХРОННОМ ДВИГАТЕЛЕ ПРИ ВРАЩАЮЩЕМСЯ РОТОРЕ

При вращении ротора скорость магнитного потока относительно ротора будет равна скорости скольжения:

$$n_s = n_1 - n_2,$$

поэтому э. д. с. и ток, наводимые в роторной обмотке, будут иметь частоту, равную частоте скольжения

$$f_2 = \frac{pn_s}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}.$$

Умножим и разделим правую часть этого равенства на $n_1$, тогда

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}\frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60}\frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s,$$

т. е. частота тока во вращающемся роторе зависит от частоты питающего тока и скольжения. Например, если частота питающего тока $f_1 = 400$ *гц*, то в момент пуска двигателя в ход скольжение $s = 1$ и частота тока в роторе будет $f_2 = f_1 = 400$ *гц*; при номинальной нагрузке, когда скольжение двигателя $s = 0{,}05—0{,}1$, частота $f_2$ будет составлять всего 20—40 *гц*, а при холостом ходе, когда $s \approx 0{,}005$, частота $f_2 \approx 2$ *гц*.

Э. д. с., наводимая в обмотке ротора при его вращении, будет равна:

$$E_{2s} = 4{,}44 w_2 k_{об2} f_2 \Phi = 4{,}44 w_2 k_{об2} f_1 s \Phi = E_2 s.$$

Индуктивное сопротивление обмотки вращающегося ротора

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2 = x_2 s.$$

Скольжение асинхронного двигателя изменяется в зависимости от режима его работы в пределах от $s = 1$ до $s \approx 0{,}005$, что обусловливает изменение в широком диапазоне как э. д. с. ротора, так и индуктивного сопротивления роторной обмотки.

Ток в обмотке вращающегося ротора

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2 s^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\frac{r_2^2}{s^2} + x_2^2}}.$$

Из полученного выражения видно, что величина тока во вращающемся роторе зависит от скольжения.

Ток $I_{2s}$, протекая по обмотке ротора, создает м. д. с. $F_2$, которая будет вращаться относительно ротора со скоростью $n_s = \frac{60 f_2}{p}$. Так как ротор, в свою очередь, имеет скорость вращения $n_2$, то скорость вращения м. д. с. $F_2$ в пространстве будет равна:

$$n_s + n_2 = n_1.$$

Иначе говоря, в асинхронном двигателе м. д. с. ротора $F_2$ вращается в ту же сторону и с той же скоростью, что и м. д. с. статора $F_1$. Поскольку в пространстве м. д. с. $F_1$ и $F_2$ друг относительно друга неподвижны, результирующая м. д. с. $F_0$, обусловливающая полезный магнитный поток асинхронного двигателя $\Phi$, так же как и в трансформаторе, будет равна:

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2.$$

При увеличении нагрузки на валу скольжение двигателя увеличивается и ток $I_{2s}$ в обмотке ротора растет. Согласно закону Ленца, м. д. с. ротора $F_2$ стремится ослабить магнитный поток двигателя, поэтому в первый момент после увеличения нагрузки происходит некоторое снижение э. д. с. $E_1$, наводимой в обмотке ста-

тора и уравновешивающей напряжение сети $U_1$. Однако это сопровождается ростом тока $I_1$, потребляемого двигателем из сети, в связи с чем м. д. с. обмотки статора $F_1$ увеличивается и магнитный поток двигателя Ф практически сохраняет свою величину, т. е. при постоянном напряжении на зажимах сети магнитный поток асинхронного двигателя, так же как у трансформатора, можно считать неизменным.

## § 73. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Электрическая энергия, потребляемая асинхронным двигателем из сети, в основном преобразуется в механическую энергию на его валу и частично превращается в тепло, которое нагревает отдельные части машины. Процесс преобразования энергии в асинхронном двигателе удобно иллюстрировать энергетической диаграммой, изображенной на рис. 114.

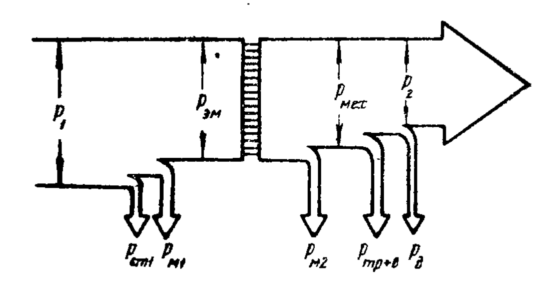



Рис. 114. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Мощность, подводимая к статору асинхронного двигателя,

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos\varphi_1,$$

где $U_1$ и $I_1$ — фазные напряжение и ток статора;
$\cos\varphi_1$ — коэффициент мощности двигателя.

В статоре возникают потери в стали $P_{ст1}$ и потери в меди $P_{м1}$, поэтому мощность, передаваемая из статора в ротор за счет вращающегося магнитного поля, будет равна:

$$P_{эм} = P_1 - P_{ст1} - P_{м1}.$$

Эта мощность называется **электромагнитной мощностью**.

В роторе также имеют место потери в стали $P_{ст2}$ и потери в меди $P_{м2}$, однако в связи с тем, что при вращении частота перемагничивания ротора мала, потери $P_{ст2}$ ничтожны и их можно не учитывать.

Таким образом, механическая мощность, идущая на создание вращающего момента двигателя, будет равна:

$$P_{мех} = P_{эм} - P_{м2}.$$

Если из механической мощности вычесть механические потери $P_{тр+в}$, включающие в себя потери на трение в подшипниках, потери на трение вращающихся частей о воздух и вентиляционные потери, а также добавочные потери $P_{д}$, то получим полезную мощность на валу двигателя, т. е.

$$P_2 = P_{мех} - P_{тр+в} - P_{д}.$$

## § 74. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ ДВИГАТЕЛЯ

Как уже известно, механическая мощность, развиваемая асинхронным двигателем,

$$P_{мех} = P_{эм} - P_{м2}.$$

Мощность в ваттах всегда может быть выражена в виде произведения момента в ньютонометрах на угловую скорость, поэтому

$$M\Omega_2 = M\Omega_1 - m_2 I_{2s}^2 r_2 .$$

Здесь $M$ — вращающий момент асинхронного двигателя;

$\Omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$ — угловая скорость вращения магнитного потока;

$\Omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}$ — угловая скорость вращения ротора;

$m_2$ — число фаз ротора; для трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором $m_2 = m_1 = 3$; для трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором $m_2 = \frac{Z_2}{p}$, где $Z_2$ — число пазов в роторе.

Решая это уравнение относительно $M$, получим

$$M = \frac{m_2 I_{2s}^2 r_2}{\Omega_1 - \Omega_2} .$$

Так как $\frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1} = s$,

то

$$M = \frac{m_2 I_{2s}^2 r_2}{\Omega_1 s} .$$

Преобразуем полученное выражение вращающего момента таким образом, чтобы в него, кроме тока ротора $I_{2s}$, входил и магнитный поток $\Phi$, создаваемый статором. Известно, что

$$I_{2s} = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2 s^2}} = \frac{4{,}44 w_2 k_{об2} f_1 \Phi s}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2 s^2}} .$$

Следовательно, подставляя значение $I_{2s}$ в формулу момента, имеем:

$$M = \frac{m_2 I_{2s} r_2}{\Omega_1 s} \frac{4{,}44 w_2 k_{об2} f_1 \Phi s}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2 s^2}} = c_M \Phi I_{2s} \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2 s^2}}$$

или

$$M = c_M \Phi I_{2s} \cos \psi_{2s},$$

где $c_M$ — постоянный коэффициент;

$\psi_{2s}$ — угол сдвига между э. д. с. ротора $E_{2s}$ и током ротора $I_{2s}$.

Таким образом, вращающий момент асинхронного двигателя пропорционален полезному магнитному потоку, создаваемому током статора, и активной составляющей тока ротора.

## § 75. ЗАВИСИМОСТЬ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ОТ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ СЕТИ

Подставим в формулу вращающего момента

$$M = \frac{m_2 I_{2s}^2 r_2}{\Omega_1 s}$$

значение тока ротора $I_{2s}$, тогда получим

$$M = \frac{m_2 E_2^2 s r_2}{\Omega_1 (r_2^2 + x_2^2 s^2)}.$$

Отношение

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{4{,}44 w_2 k_{об2} f_1 \Phi}{4{,}44 w_1 k_{об1} f_1 \Phi} = \frac{w_2 k_{об2}}{w_1 k_{об1}} = k_д$$

есть величина постоянная, поэтому

$$E_2 = k_д E_1.$$

Если считать, что э. д. с. $E_1 \approx U_1$, то $E_2 \approx k_д U_1$, тогда

$$M \approx \frac{m_2 k_д^2 U_1^2 s r_2}{\Omega_1 (r_2^2 + x_2^2 s^2)} \approx c_1 \frac{U_1^2 s r_2}{r_2^2 + x_2^2 s^2},$$

где $c_1$ — постоянный коэффициент.

Таким образом, вращающий момент асинхронного двигателя практически пропорционален квадрату напряжения сети. Это вполне понятно, так как от напряжения, подводимого к двигателю, зависит как магнитный поток, так и ток ротора. Чувствительность

к колебаниям напряжения является существенным недостатком асинхронного двигателя.

При изменении частоты сети изменяется скорость вращения двигателя и вместе с тем изменяется индуктивное сопротивление обмотки ротора, что сказывается на величине вращающего момента. Если, например, частота сети увеличивается, то $x_2$ возрастает и, как это видно из формулы, вращающий момент двигателя снижается. Следовательно, увеличение частоты сети приводит к ухудшению рабочих свойств асинхронного двигателя.

## § 76. ЗАВИСИМОСТЬ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ОТ СКОЛЬЖЕНИЯ

Приступая к рассмотрению зависимости $M=f(s)$, которая называется механической характеристикой двигателя, полагаем, что $U_1=\text{const}$ и, следовательно,

$$M=c_2\frac{sr_2}{r_2^2+x_2^2s^2}.$$

Из приведенной формулы видно, что при малых скольжениях, когда $s^2\approx 0$, вращающий момент асинхронного двигателя изменяется пропорционально скольжению: $M\approx c_2\frac{s}{r_2}$, поэтому начальная часть характеристики $M=f(s)$ представляет собой практически прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 115), причем чем больше сопротивление ротора, тем больше наклон линейной части характеристики к оси абсцисс.

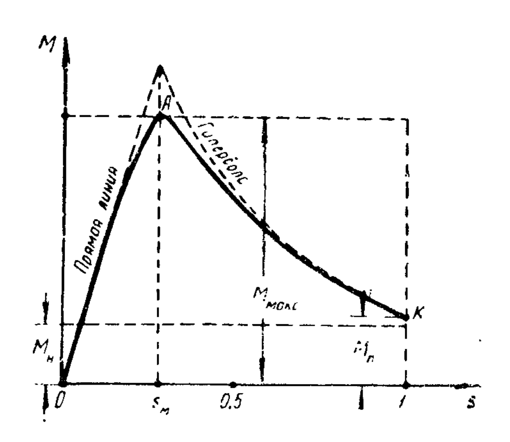


Рис. 115. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения

При больших скольжениях ротор обладает значительным индуктивным сопротивлением, следовательно, слагаемым $r_2^2$ можно пренебречь и считать, что $M\approx c_2\frac{r_2}{x_2^2s}$. В этом случае зависимость $M=f(s)$ будет изображаться кривой, близкой по своему характеру к гиперболе.

Таким образом, при изменении скольжения от 0 до 1 вращающий момент асинхронного двигателя сначала быстро растет и при некотором скольжении $s_м$ достигает максимальной величины $M_{макс}$ (участок $OA$, рис. 115), а затем плавно убывает

(участок *АК*). Первый участок является участком устойчивой работы асинхронного двигателя. При работе на этом участке увеличение нагрузки на валу не нарушает работы двигателя, так как одновременно с ростом скольжения увеличивается его вращающий момент, в связи с чем снова устанавливается равновесие моментов, но при несколько пониженной скорости вращения. На втором участке устойчивая работа асинхронного двигателя невозможна, так как случайное увеличение нагрузки на валу сопровождается ростом скольжения и снижением величины вращающего момента, что приводит к остановке двигателя. Таким образом, работа асинхронного двигателя всегда происходит на участке *ОА*. Наибольший момент $M_{макс}$, до которого можно нагружать двигатель, часто называют **опрокидывающим моментом**, а его отношение к номинальному моменту $M_н$

$$k_м = \frac{M_{макс}}{M_н}$$

**кратностью максимального момента** или коэффициентом перегрузочной способности двигателя. Обычно у бортовых асинхронных двигателей $k_м = 2 \div 2{,}6$.

Чтобы определить величину скольжения $s_м$, при котором вращающий момент асинхронного двигателя имеет максимальное значение, возьмем производную от момента $M$ по скольжению $s$ и приравняем ее нулю:

$$\frac{dM}{ds} = c_2 \frac{r_2 [(r_2^2 + x_2^2 s^2) - 2x_2^2 s^2]}{(r_2^2 + x_2^2 s^2)^2} = c_2 \frac{r_2 (r_2^2 - x_2^2 s^2)}{(r_2^2 + x_2^2 s^2)^2} = 0,$$

откуда

$$r_2^2 - x_2^2 s^2 = 0$$

и

$$s = s_м = \frac{r_2}{x_2}.$$

Если значение скольжения $s_м = \frac{r_2}{x_2}$ подставить в формулу

$$M = c_2 \frac{s r_2}{r_2^2 + x_2^2 s^2},$$

то получим выражение для максимального вращающего момента асинхронного двигателя

$$M_{макс} = c_2 \frac{1}{2x_2}.$$

Таким образом, величина $M_{макс}$ не зависит от активного сопротивления ротора, а определяется только его индуктивным сопротивлением при частоте питающего тока. Скольжение же $s_м$, соответствующее этому моменту, зависит от соотношения между активным и индуктивным сопротивлениями ротора. Чем больше активное сопротивление ротора, тем, при прочих равных условиях, правее располагается максимум кривой $M = f(s)$ и больший пусковой момент развивает двигатель (рис. 116). При равенстве активного и индуктивного сопротивлений цепи ротора скольжение $s_м = 1$ и, следовательно, максимальный вращающий момент у двигателя будет при пуске.

Противоречие, которое на первый взгляд имеет место между ростом пускового момента и уменьшением тока ротора, обусловленного увеличением активного сопротивления в роторной цепи, можно объяснить следующим образом. Пусковой момент асинхронного двигателя зависит от магнитного потока и активной составляющей тока ротора:

$$M = c_M \Phi I_2 \cos \psi_2 .$$

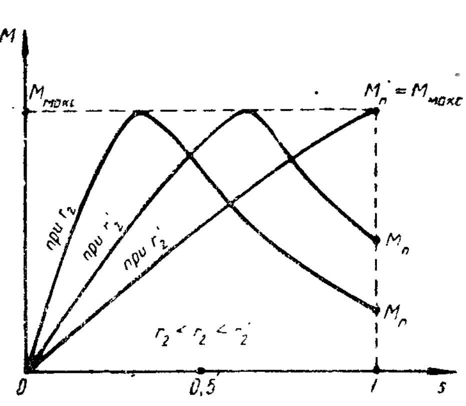



Рис. 116. Кривые $M = f(s)$ при различном активном сопротивлении цепи ротора

Рис. 117. Векторная диаграмма роторной цепи асинхронного двигателя при пуске в ход

В момент включения двигателя в сеть ток ротора $\dot{I}_2$ достигает очень большой величины. Так как индуктивное сопротивление заторможенного ротора очень велико, ток $\dot{I}_2$ будет сильно отставать от э. д. с. $\dot{E}_2$ (рис. 117), поэтому активная составляющая тока ротора будет мала $(\dot{I}_{2a})$ и пусковой момент незначителен. При увеличении активного сопротивления ротора величина тока в нем снижается $(\dot{I}'_2)$ и одновременно с этим уменьшается угол между током $\dot{I}'_2$ и э. д. с. $\dot{E}_2$. В результате этого в определенных пределах увеличение $r_2$ приводит к росту активной составляющей тока ротора и, следовательно, к увеличению пускового момента.

## § 77. ПУСК В ХОД АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Индуктивное сопротивление обмотки неподвижного ротора, как известно, во много раз превышает ее активное сопротивление, поэтому в момент включения асинхронного двигателя в сеть ток ротора имеет значительную индуктивную составляющую, которая, не создавая вращающего момента, оказывает сильное размагничивающее действие на магнитное поле двигателя. Это вызывает снижение величины э. д. с. $E_1$, наводимой в обмотке статора и уравновешивающей приложенное к нему напряжение, и приводит к значительному росту тока, потребляемого двигателем из сети.

Пусковой ток у бортовых трехфазных асинхронных двигателей $I_n = 3 \div 6 I_н$, а пусковой момент $M_n = 1 \div 2{,}5 M_н$. У наземных короткозамкнутых асинхронных двигателей $I_n = 4 \div 7 I_н$ и $M_н = 0{,}8 \div 1{,}5 M_н$. Более высокие пусковые характеристики у бортовых асинхронных двигателей обеспечиваются за счет применения роторов с повышенным активным сопротивлением. С этой целью беличьи клетки бортовых асинхронных двигателей выполняют обычно не из меди, а из латуни, которая имеет более высокое удельное сопротивление, чем медь.

### 1. Пуск в ход асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Обычно пуск в ход наземных и бортовых короткозамкнутых асинхронных двигателей производится непосредственным включением в сеть. Однако в наземных условиях, в тех случаях, когда двигатели обладают значительными мощностями и непосредственное включение их в сеть может вызвать резкое снижение напряжения на зажимах сети, применяют специальные схемы, основанные на понижении напряжения, подводимого к обмотке статора двигателя при пуске. Для этой цели используют пусковые сопротивления, которые включают на время пуска в каждую фазу обмотки статора, автотрансформаторы или специальные переключатели, позволяющие производить переключение обмотки статора со звезды на треугольник.

Схемы пуска с пусковыми сопротивлениями или автотрансформатором ввиду их громоздкости получили ограниченное применение в наземном электроприводе.

Переключение обмотки статора со звезды на треугольник иногда применяется для пуска короткозамкнутых асинхронных двигателей мощностью до 30 *квт*, у которых обмотка статора в рабочем положении соединена треугольником. Схема пуска изображена на рис. 118. Пуск двигателя производится следующим образом. Переключатель *П* ставится в положение «пуск» и включается рубильник *Р*. После того как двигатель придет во вращение и достигнет установившейся скорости, переключатель *П* быстро перебрасывается в положение «работа». Как видно из схемы, при пу-

сковом положении переключателя обмотка статора соединена звездой, а при рабочем положении — треугольником.

Чтобы выяснить, во сколько раз снижается пусковой ток двигателя при такой схеме пуска, рассмотрим соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями.

При включении на напряжение сети $U_c$ обмотки статора, соединенной звездой, пусковой ток

$$I_{плY} = I_{пфY} = \frac{U_ф}{z_1} = \frac{U_{лY}}{\sqrt{3}z_1} = \frac{U_c}{\sqrt{3}z_1},$$

где $z_1$ — полное сопротивление фазы статора.

При соединении обмотки статора треугольником

$$I_{пл\Delta} = \sqrt{3}I_{пф\Delta} = \sqrt{3}\,\frac{U_{ф\Delta}}{z_1} = \sqrt{3}\,\frac{U_{л\Delta}}{z_1} = \sqrt{3}\,\frac{U_c}{z_1}.$$

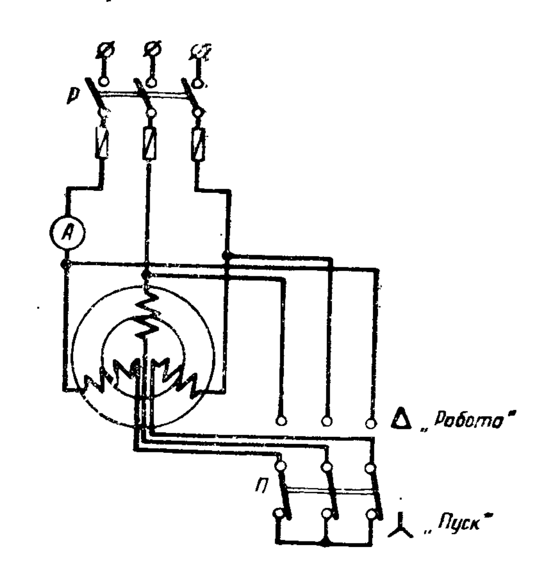



Рис. 118. Схема пуска в ход короткозамкнутого асинхронного двигателя переключением обмотки статора со звезды на треугольник

Следовательно,

$$\frac{I_{плY}}{I_{пл\Delta}} = \frac{1}{3},$$

т. е. пусковой ток двигателя при соединении обмотки статора звездой будет в три раза меньше, чем при соединении обмотки треугольником. Поскольку в этом случае напряжение, подводимое к фазе обмотки статора, снижается в $\sqrt{3}$ раз, пусковой момент двигателя уменьшается также в три раза.

## 2. Короткозамкнутые асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками

Рассмотренные выше трехфазные асинхронные двигатели с обычным короткозамкнутым ротором не отличаются высокими пусковыми свойствами. При пуске они потребляют из сети значительные пусковые токи и развивают сравнительно небольшие пусковые моменты. Чтобы устранить эти недостатки и в то же время

сохранить простоту конструкции и надежность в работе, роторы короткозамкнутых асинхронных двигателей иногда выполняют с двойной беличьей клеткой или с глубоким пазом.

Двигатель с двойной беличьей клеткой, впервые предложенный М. О. Доливо-Добровольским в 1893 году, имеет ротор, представляющий собой барабан, в пазах которого размещены стержни двух беличьих клеток (рис. 119, *а*). Внутренняя беличья клетка, которая является рабочей обмоткой ротора, выполняется из красной меди. Поскольку с ней сцепляется значительный магнитный поток рассеяния, она обладает сравнительно большим индуктивным сопротивлением. Наружная беличья клетка выполняет роль пусковой обмотки. Она обычно изготовляется из материала с более высоким удельным сопротивлением, например латуни или бронзы, и имеет ничтожное индуктивное сопротивление, так как магнитный поток рассеяния, замыкающийся около нее, очень мал. Клетки друг от друга отделены узкой щелью, что обеспечивает сцепление основного магнитного потока статора с рабочей обмоткой ротора.

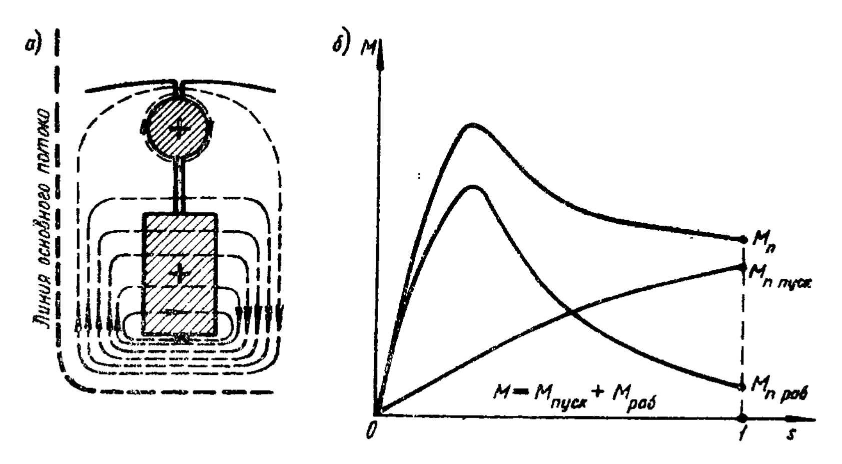



Рис. 119. Паз ротора и кривые вращающего момента асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой

В момент пуска двигателя в ход, когда частота тока в роторе равна частоте сети, индуктивное сопротивление внутренней клетки ротора очень велико и ее полное сопротивление в несколько раз превышает полное сопротивление наружной клетки. В результате этого большая часть тока ротора протекает по наружной клетке. Поскольку эта клетка обладает в основном активным сопротивлением, ток в ней почти совпадает по фазе с э. д. с., что обеспечивает создание наружной клеткой значительного пускового момента $M_{п\,пуск}$ (рис. 119, *б*). Во внутренней клетке ротора при этом протекает небольшой, практически индуктивный, ток, который создает незначительный вращающий момент $M_{п\,раб}$.

По мере того как скорость вращения ротора возрастает, частота тока в нем уменьшается. Это приводит к снижению величины индуктивного сопротивления внутренней клетки ротора и, следовательно, к увеличению тока в ней. Причем одновременно с увеличением тока уменьшается угол сдвига между током и э. д. с., т. е. ток по своему характеру становится более активным. Таким образом, вращающий момент, создаваемый внутренней клеткой ротора, постепенно увеличивается, а вращающий момент, создаваемый наружной клеткой, — уменьшается. Когда процесс пуска заканчивается и скорость вращения ротора устанавливается, ток между клетками распределяется практически обратно пропорционально их активным сопротивлениям. Поскольку активное сопротивление

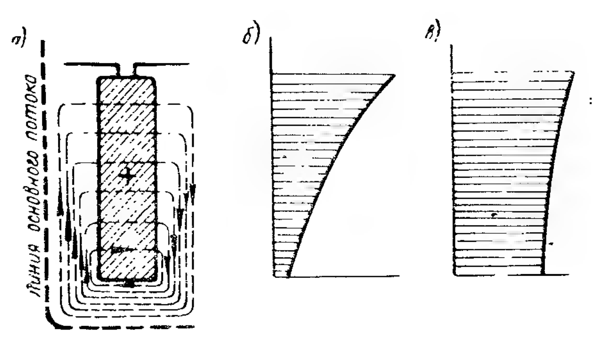



Рис. 120. Ротор асинхронного двигателя с глубоким пазом:

а) схема потоков рассеяния паза; б) распределение плотности тока в стержне в момент пуска двигателя; в) распределение плотности тока в стержне во время работы двигателя

у внутренней (рабочей) клетки значительно меньше, чем у наружной (пусковой), вращающий момент, создаваемый ею, будет значительно больше вращающего момента, развиваемого наружной клеткой.

Наземные асинхронные двигатели с двойной беличьей клеткой имеют: $I_n = 3{,}5 \div 5{,}5 I_н$ и $M_n = 1 \div 2M_н$.

Двигатель с глубоким пазом конструктивно проще двигателя с двойной беличьей клеткой. Ротор такого двигателя имеет полузакрытые пазы обычно прямоугольной формы (рис. 120, *а*), в которых размещаются узкие высокие прямоугольные стержни, замкнутые с торцов ротора кольцами.

При прохождении тока около каждого стержня возникает магнитный поток рассеяния. Так как магнитные линии всегда стремятся замкнуться по пути с наименьшим магнитным сопротивлением, нижние участки стержня будут охватываться значительно большим числом магнитных линий, чем верхние, и, следовательно, индуктивное сопротивление нижних участков всегда будет больше верхних.

В момент включения двигателя в сеть, когда частота тока в роторе равна частоте сети, индуктивное сопротивление нижних участков стержня резко возрастает, в то время как индуктивное сопротивление верхних участков увеличивается незначительно. В результате этого ток ротора как бы вытесняется в верхнюю часть стержня (рис. 120, *б*), что равносильно увеличению его активного сопротивления. По мере разгона ротора частота тока в нем уменьшается и поверхностный эффект в стержнях проявляется все меньше и меньше. В конце пуска, когда частота тока в роторе будет ничтожно мала и ротор будет обладать небольшим, практически только активным, сопротивлением, ток по сечению стержней будет распределяться примерно равномерно (рис. 120, *в*). Таким образом, у двигателя с глубоким пазом во время пуска за счет явления вытеснения тока происходит автоматическое изменение активного сопротивления клетки ротора. Это обеспечивает ему при несколько меньшем пусковом токе бо́льший пусковой момент, чем у асинхронных двигателей с обычным короткозамкнутым ротором.

Несмотря на более высокие пусковые свойства, асинхронные двигатели с двойной беличьей клеткой и глубоким пазом пока не получили широкого применения на летательных аппаратах. Объясняется это в основном трудностями выполнения двойной беличьей клетки и глубокого паза в роторах малого диаметра.

### 3. Пуск в ход асинхронных двигателей с фазным ротором

Среди двигателей переменного тока асинхронные двигатели с фазным ротором обладают наиболее высокими пусковыми свойствами. Значительный пусковой момент при небольшом пусковом токе у этих двигателей достигается за счет введения в цепь ротора дополнительного активного сопротивления в виде пускового реостата $R_n$ (см. рис. 108). Благодаря пусковому реостату, в момент пуска уменьшается ток ротора, а следовательно, и ток, потребляемый двигателем из сети. Одновременно с этим увеличивается активная составляющая тока ротора, что приводит к росту пускового момента двигателя. Если сопротивление пускового реостата подобрать так, что активное сопротивление цепи ротора $(r_2 + R_n)$ будет равно индуктивному сопротивлению обмотки ротора $x_2$, асинхронный двигатель будет обладать максимальным пусковым моментом (см. § 76).

Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором производится следующим образом. Сопротивление пускового реостата полностью вводится в цепь ротора и статор двигателя рубильником приключается к сети. По мере того как скорость вращения двигателя возрастает, э. д. с. $E_{2s}$, наводимая в обмотке ротора, и ток ротора $I_{2s}$ уменьшаются. Сопротивление реостата $R_n$ постепенно выводится с таким расчетом, чтобы пусковой ток двигателя $I_n$ не превышал бы $1{,}5 - 2I_н$. О величине этого тока можно судить по показаниям амперметра, включенного в цепь об-

мотки статора. После того как пусковой реостат будет полностью выведен и пуск двигателя окончен, кольца ротора с помощью специального приспособления, если оно имеется у двигателя, замыкаются накоротко и щетки поднимаются с колец.

## § 78. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называют зависимости скорости вращения $n_2$, вращающего момента $M$, коэффициента мощности $\cos\varphi_1$ и коэффициента полезного действия $\eta$ от мощности на валу двигателя $P_2$ при

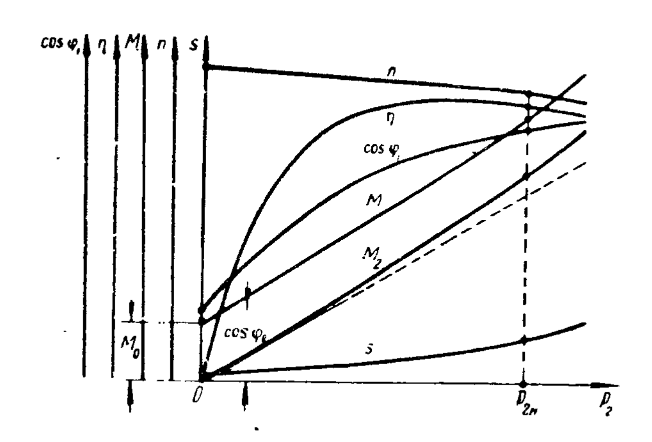



Рис. 121. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

постоянном напряжении на его зажимах и неизменной частоте сети, т. е.

$$n_2,\ M,\ \cos\varphi_1,\ \eta = f(P_2)\ \text{при}\ U_1 = \text{const}\ \text{и}\ f_1 = \text{const}.$$

Первая из этих характеристик, так же как у двигателей постоянного тока, называется скоростной, а вторая — моментной. Кроме того, к рабочим характеристикам обычно относят зависимость $s = f(P_2)$, а иногда и зависимости $I_1$, $P_1 = f(P_2)$ при тех же постоянных $U_1$ и $f_1$.

Примерный вид основных рабочих характеристик асинхронного двигателя показан на рис. 121. Скоростная характеристика асинхронного двигателя по внешнему виду очень напоминает скоростную характеристику двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Характеристика скольжения $s = f(P_2)$ изображается кривой, выпуклость которой обращена в сторону оси абсцисс. Объясняется это ростом потерь в меди ротора при увеличении нагрузки.

Зависимость полезного момента на валу двигателя от полезной мощности определяется выражением

$$M_2 c = \frac{P_2}{n_2},$$

где $c$ — постоянный коэффициент.

Если предположить, что скорость вращения асинхронного двигателя не зависит от нагрузки на валу, то характеристика $M_2 = f(P_2)$ представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат. Однако в реальных условиях рост нагрузки сопровождается некоторым снижением скорости вращения, поэтому действительная характеристика полезного момента $M_2 = f(P_2)$ несколько отклоняется от прямой линии вверх.

В установившемся режиме работы вращающий момент, развиваемый асинхронным двигателем, равен:

$$M = M_0 + M_2,$$

где $M_0$ — момент холостого хода, определяемый потерями в стали и механическими потерями двигателя. Поскольку эти потери практически не зависят от нагрузки, моментная характеристика двигателя $M = f(P_2)$ изображается кривой, проходящей параллельно характеристике $M_2 = f(P_2)$.

Асинхронный двигатель потребляет из сети как активный, так и реактивный ток, поэтому коэффициент мощности у него всегда меньше единицы. При холостом ходе, когда реактивная составляющая тока относительно велика, коэффициент мощности двигателя обычно не превышает 0,2—0,25. По мере того как нагрузка на валу двигателя увеличивается и активная составляющая тока растет, коэффициент мощности повышается. При номинальной нагрузке коэффициент мощности обычно равен $\cos\varphi_1 = 0{,}7 \div 0{,}8$.

Характеристика коэффициента полезного действия асинхронного двигателя $\eta = f(P_2)$ имеет такой же вид, как у электрической машины постоянного тока, т. е. вначале коэффициент полезного действия быстро растет, затем в определенном диапазоне нагрузок почти не изменяется и, наконец, медленно падает. Несмотря на несколько повышенные потери в роторе, коэффициент полезного действия у бортовых асинхронных двигателей не ниже, чем у бортовых двигателей постоянного тока. Величина его обычно колеблется в пределах от 0,6 до 0,83, причем более мощные двигатели имеют более высокий коэффициент полезного действия.

## § 79. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя можно осуществить изменением частоты питающего тока, изменением числа пар полюсов обмотки статора, изменением напряже-

ния на зажимах двигателя и изменением активного сопротивления цепи ротора.

Первый способ применим только тогда, когда питание асинхронного двигателя осуществляется от специального генератора. Применяется он довольно редко вследствие громоздкости, сложности и малой экономичности.

Для регулирования скорости вращения асинхронного двигателя путем изменения числа пар полюсов обмотки статора каждая фаза этой обмотки выполняется из двух катушек, которые можно соединить между собой последовательно или параллельно. Схема переключения катушек показана на рис. 122 на примере одной фа-

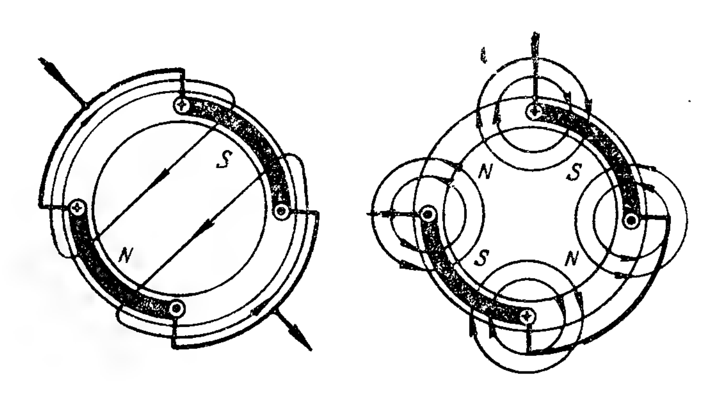



**Рис. 122. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя изменением числа пар полюсов**

зы. Как видно из рисунка, при параллельном соединении катушек в двигателе будет двухполюсное магнитное поле, вращающееся со скоростью $n_1 = 60f_1$. Если катушки соединить последовательно, то магнитное поле станет четырехполюсным и скорость вращения его уменьшится вдвое, т. е. $n_1$ будет равно $\frac{60f_1}{2}$. Таким образом, этот способ регулирования дает возможность получить только ступенчатое изменение скорости вращения асинхронного двигателя.

Изменение напряжения на зажимах двигателя, как известно, сопровождается резким изменением вращающего момента. Чем меньше напряжение, тем ниже располагается кривая $M = f(s)$ (рис. 123,*а*). Если на валу двигателя будет постоянный момент сопротивления ($M_c = \text{const}$), то при снижении напряжения от $U_1$ до $U'_1$ вращающий момент двигателя $M$ в первый момент упадет. Это приведет к уменьшению скорости вращения и, следовательно, к увеличению скольжения. Равенство моментов $M = M_c$ снова восстановится, но уже при скольжении $s' > s$.

При введении добавочного активного сопротивления в цепь фазного ротора скольжение асинхронного двигателя увеличивается и его скорость вращения снижается. На рис. 123,*б* изоб-

ражены характеристики $M = f(s)$ для двух значений активного сопротивления ротора. Из графика видно, что при увеличении этого сопротивления от $r_2$ до $r'_2$ скольжение асинхронного двигателя в случае постоянной нагрузки на валу ($M_c = \text{const}$) повышается от $s$ до $s'$.

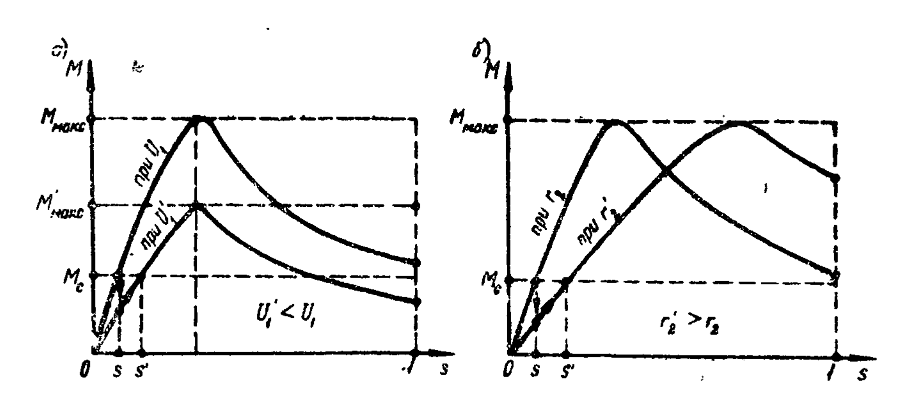



Рис. 123. Регулирование скорости вращения асинхронного двигателя: а) изменением напряжения на зажимах; б) введением добавочного сопротивления в цепь ротора

Таким образом, в отличие от двигателей постоянного тока, трехфазные асинхронные двигатели не имеют простых и экономичных способов регулирования скорости вращения. В связи с этим их обычно применяют для привода таких агрегатов, где не требуется регулировать скорость вращения.

## § 80. ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Однофазный асинхронный двигатель имеет статор с однофазной обмоткой и короткозамкнутый ротор в виде беличьей клетки. Если к обмотке статора подвести переменный ток, то в машине возникнет пульсирующая м. д. с., которая создаст пульсирующий магнитный поток.

Пульсирующую по синусоидальному закону м. д. с. всегда можно рассматривать состоящей из двух м. д. с. — $F_1$ и $F_2$, имеющих половинные амплитуды и вращающихся в разные стороны с одинаковой скоростью. Из рис. 124 видно, что в момент $t = 0$ векторы м. д. с. $\dot{F}_1$ и $\dot{F}_2$ находятся в противофазе, в связи с чем результирующая м. д. с. $\dot{F}$ равна нулю. По мере того как векторы $\dot{F}_1$ и $\dot{F}_2$ поворачиваются, результирующая м. д. с. сначала плавно увеличивается до максимального значения $+F_{макс}$, а затем убывает до нуля. В момент $t = 1/2T$ результирующая м. д. с. изменяет свой знак и опять начинает возрастать, но уже в противоположном направлении. Спустя период изменения тока, когда векторы м. д. с.

$\dot{F}_1$ и $\dot{F}_2$ возвращаются в исходное положение, результирующая м. д. с. $\dot{F}$ снова будет равна нулю.

Отсюда видно, что при включении однофазного асинхронного двигателя в сеть на его ротор будут действовать одновременно два вращающих момента, равных по величине и направленных в противоположные стороны. Это означает, что у однофазного асин-

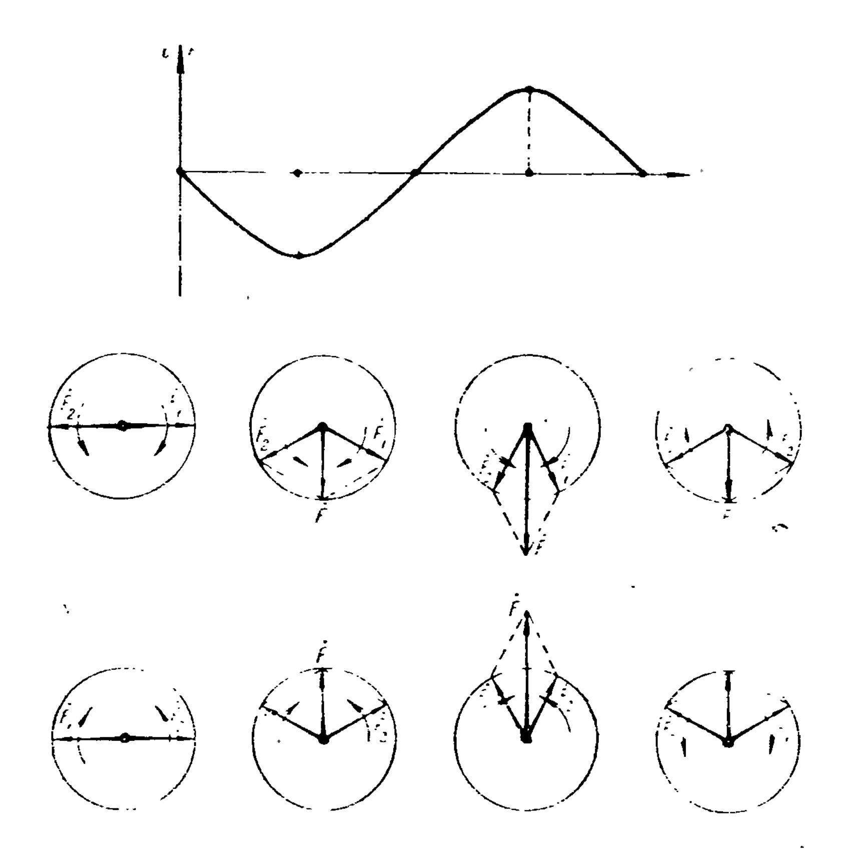


Рис. 124. Образование пульсирующего магнитного поля с помощью двух магнитных полей, вращающихся в разные стороны

хронного двигателя отсутствует пусковой момент. Если каким-либо способом ротор двигателя привести во вращение, то он будет вращаться самостоятельно со скоростью $n_2$.

М. д. с. и магнитное поле, которые вращаются в ту же сторону, что и ротор, называют **прямыми**, а вращающиеся в противоположную сторону — **обратными**.

Частота тока, наводимого в обмотке ротора прямым полем, будет равна

$$f_{2\,пр} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60},$$

а частота тока, наводимого в этой же обмотке обратным полем, будет

$$f_{2\,об} = \frac{p(n_1 + n_2)}{60}.$$

Если скорость $n_2$ близка к синхронной скорости $n_1$, частота $f_{2\,пр}$ будет во много раз меньше частоты $f_{2\,об}$, и индуктивное сопротивление ротора $x_{2s\,пр}$ будет ничтожно мало по сравнению с $x_{2s\,об}$. В связи с этим ток, наводимый в роторе прямым полем, будет иметь значительную активную составляющую и будет создавать значительный вращающий момент $M_{пр}$, а ток, наводимый в роторе обратным полем, являясь индуктивным током, бу-

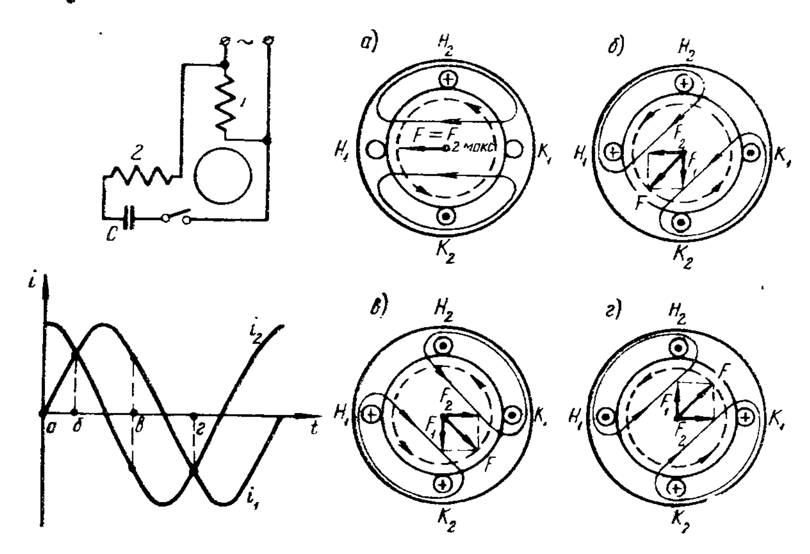



Рис. 125. Вращающееся круговое магнитное поле двухфазного тока

дет сильно ослаблять обратное магнитное поле двигателя и будет создавать небольшой тормозной момент. Таким образом, у однофазного асинхронного двигателя результирующий вращающий момент

$$M = M_{пр} - M_{об}.$$

Для пуска однофазных асинхронных двигателей на статоре под углом 90° к рабочей обмотке *1* размещают пусковую обмотку *2*, которую приключают к сети обычно через конденсатор *C* (рис. 125). При этом переменные токи, протекающие в рабочей и пусковой обмотках, будут смещены по фазе на угол 90°, что даст возможность получить в двигателе вращающееся магнитное поле.

Предположим, что ток в рабочей обмотке *1* изменяется по закону синуса: $i_1 = I_{1\,макс} \sin \omega t$, тогда в пусковой обмотке *2* ток будет изменяться по закону косинуса $i_2 = I_{2\,макс} \cos \omega t$ (рис. 125).

Мгновенное значение результирующей м. д. с. в этом случае будет равно геометрической сумме м. д. с. обмоток:

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = \sqrt{F_{1\,макс}^2 \sin^2 \omega t + F_{2\,макс}^2 \cos^2 \omega t}.$$

Если амплитудные значения токов $I_{1\,макс}$ и $I_{2\,макс}$ в рабочей и пусковой обмотках будут равны, то при одинаковом числе витков у обмоток $F_{1\,макс} = F_{2\,макс} = F_{макс}$ и, следовательно,

$$F = F_{макс} \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t} = F_{макс}.$$

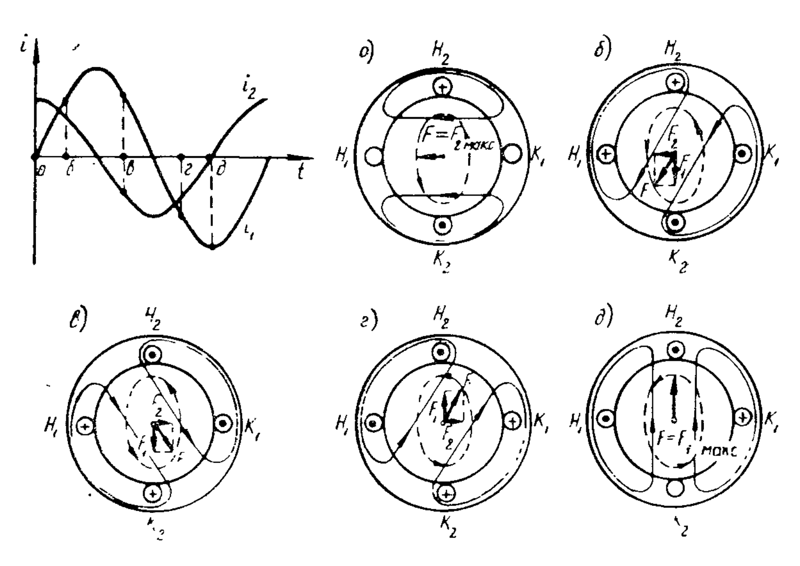



Рис. 126. Вращающееся эллиптическое магнитное поле двухфазного тока

Положение вектора результирующей м. д. с. $\dot{F}$ относительно обмотки статора будет характеризоваться углом

$$\beta = \operatorname{arc\,tg} \frac{F_1}{F_2} = \operatorname{arc\,tg} \frac{F_{1\,макс} \sin \omega t}{F_{2\,макс} \cos \omega t} = \omega t.$$

Таким образом, в случае симметричной двухфазной системы, когда $I_{1\,макс} = I_{2\,макс}$, результирующая м. д. с. изображается вектором неизменной величины, который вращается с постоянной угловой скоростью, равной угловой частоте питающего тока $\omega$. Так как конец вектора $\dot{F}$ в этом случае описывает окружность, вращающееся магнитное поле называется к р у г о в ы м (рис. 125).

Если система питания обмоток несимметрична, например $I_{2\,макс} < I_{1\,макс}$ и, следовательно, $F_{2\,макс} < F_{1\,макс}$, то, как это видно из рис. 126, вектор результирующей м. д. с. $\dot{F}$ изменяется по ве-

личине и конец его описывает эллипс с полуосями $F_{1\,макс}$ и $F_{2\,макс}$. Такое вращающееся магнитное поле является **эллиптическим**.

При включении двигателя в сеть вращающееся магнитное поле будет увлекать за собой ротор, обеспечивая, таким образом, пуск двигателя. После того как ротор придет во вращение и достигнет скорости, близкой к синхронной, пусковая обмотка обычно отключается, а ротор в дальнейшем увлекается прямым магнитным полем однофазного тока.

Однофазные асинхронные двигатели вследствие наличия обратного магнитного поля имеют более низкий к. п. д. и коэффициент мощности, а также меньший опрокидывающий момент, чем трехфазные асинхронные двигатели.

В настоящее время ряд маломощных однофазных асинхронных двигателей рассчитывается на работу с постоянно включенным конденсатором. Такие двигатели получили название однофазных **конденсаторных** двигателей. Конденсаторные двигатели по сравнению с однофазными асинхронными двигателями имеют лучшие рабочие характеристики. Основной их недостаток — это наличие конденсаторной батареи, которая по своим размерам обычно превышает размеры двигателя.

Бортовые однофазные асинхронные двигатели изготовляются сравнительно небольшой мощности — от нескольких десятков до нескольких сотен ватт.

---

*ГЛАВА IX*

# СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

## § 81. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Элементарным однофазным синхронным генератором является виток, вращающийся в магнитном поле постоянных магнитов (см. рис. 3). При вращении витка в нем наводится переменная э. д. с. (см. рис. 4). Если к витку через кольца и щетки присоединить сопротивление $R$, то в цепи возникнет однофазный переменный ток.

Для получения трехфазного тока на роторе под углом 120° друг к другу необходимо разместить три катушки $AX$, $BY$ и $CZ$, иногда называемые фазами (рис. 127). При вращении в магнитном поле в катушках будут наводиться переменные э. д. с. $e_1$, $e_2$, $e_3$, амплитудные значения которых будут сдвинуты друг относительно друга на угол 120°. В случае, если эти катушки соединить звездой или треугольником, приключить к кольцам, а затем через кольца и щетки соединить с внешней цепью, то в цепи будет протекать трехфазный переменный ток. Частота переменного тока, как известно,

(см. § 2) будет определяться скоростью вращения обмотки и числом пар полюсов, т. е.

$$f = \frac{pn}{60}.$$

На летательных аппаратах обычно применяется переменный ток стандартной частоты 400 *гц*. Поэтому бортовые синхронные генераторы в зависимости от числа пар полюсов должны иметь следующие номинальные скорости вращения:

| | |
|---|---|
| при $p = 1$ | $n = 24000$ *об/мин* |
| „ $p = 2$ | $n = 12000$ *об/мин* |
| „ $p = 3$ | $n = 8000$ *об/мин* |
| „ $p = 4$ | $n = 6000$ *об/мин* |
| „ $p = 5$ | $n = 4800$ *об/мин* |
| „ $p = 6$ | $n = 4000$ *об/мин* |

Во вращение бортовые синхронные генераторы приводятся от двигателей летательных аппаратов, имеющих обычно переменную

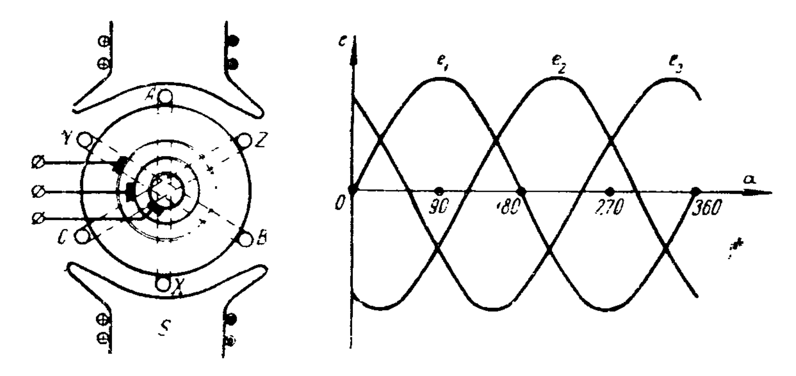



Рис. 127. Принцип действия трехфазного синхронного генератора

скорость вращения, или от специальных приводных двигателей. При изменении скорости вращения приводного двигателя будут изменяться напряжение и частота генератора. Напряжение в этом случае можно поддержать на требуемом уровне с помощью угольного регулятора напряжения, изменяя ток возбуждения генератора. Получить постоянную частоту можно при помощи муфт постоянной скорости. Однако эти муфты обладают довольно сложным устройством и значительным весом, поэтому широкого применения не получили. Других удовлетворительных способов поддержания постоянной частоты в настоящее время нет. Поэтому синхронные генераторы, приводимые во вращение от двигателей летательного аппарата, можно использовать для питания только таких потребителей, на работу которых изменение частоты не оказывает заметного влияния.

Привод синхронного генератора от автономного двигателя дает возможность сравнительно просто обеспечить постоянную частоту генератора. Однако и ему присущи существенные недостатки такие, как большой вес, значительные габаритные размеры, низкий к. п. д., которые ограничивают его применение на самолетах и ракетах.

Нашей промышленностью выпускаются бортовые синхронные генераторы, рассчитанные как на постоянную, так и на переменную скорость вращения (см. таблицу 7).

## § 82. УСТРОЙСТВО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

В зависимости от конструктивного исполнения индуктора различают два типа синхронных генераторов: явнополюсные и неявнополюсные. У явнополюсного синхронного генератора имеются явно выраженные выступающие полюсы с полюсными катушками, которые могут размещаться как на статоре (рис. 127), так и на роторе (рис. 128, *а*). Чтобы получить примерно синусоидальный закон распределения магнитной индукции в воздушном зазоре генератора, края полюсных наконечников несколько скашивают. У неявнополюсного синхронного генератора ротор, на котором размещается индуктор, имеет цилиндрическую форму. Для размещения обмотки возбуждения в роторе фрезеруются специальные пазы (рис. 128, *б*).

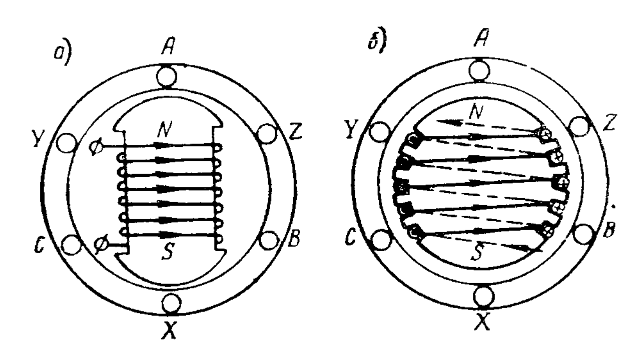



Рис. 128. Синхронный генератор:
а) с явнополюсным ротором; б) с неявнополюсным ротором

В настоящее время на летательных аппаратах применяются обычно трехфазные синхронные генераторы мощностью до 90 *ква*, напряжением 120/208 *в*.

У генераторов мощностью до 15 *ква* индуктор, как правило, размещается на статоре, а якорная обмотка на роторе. Ток снимается с якоря через контактные кольца и щеточное устройство (см. рис. 127). Выбор такой схемы исполнения генератора объясняется в основном тем, что у многополюсной машины при неболь-

шом диаметре ротора окна между полюсными выступами ротора невелики и в них трудно разместить полюсные катушки с большим числом витков. Кроме того, такая машина имеет несколько меньший вес и меньшие габаритные размеры, так как корпус машины одновременно является частью ее магнитопровода.

При протекании значительных токов через скользящий контакт трудно обеспечить надежную работу щеточного аппарата, поэтому у генераторов мощностью свыше 15 *ква* обмотка якоря размещается в пазах статора, а индуктор располагается на роторе (см. рис. 128). Такая схема исполнения для синхронных генераторов является основной.

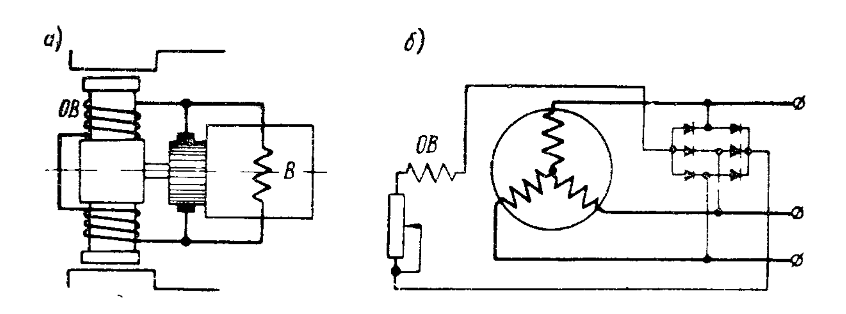



Рис. 129. Схемы питания обмотки возбуждения

Подавляющее большинство современных бортовых синхронных генераторов имеет явнополюсное исполнение. Скорость вращения у них при частоте $f = 400$ *гц* не превышает 8000 *об/мин*. Неявнополюсными выполняются только некоторые мощные бортовые синхронные генераторы, имеющие скорость вращения 12000 или 24000 *об/мин*, которые приводятся во вращение от специальных воздушных или газовых турбин.

По способу возбуждения синхронные генераторы подразделяются на генераторы с постоянными магнитами и генераторы с электромагнитным возбуждением. При электромагнитном возбуждении питание обмотки возбуждения *ОВ* обычно осуществляется либо от специального возбудителя *В*, представляющего собой генератор постоянного тока с параллельным возбуждением, размещенный на валу синхронного генератора (рис. 129, *а*), либо по схеме самовозбуждения. В этом случае обмотка возбуждения *ОВ* получает питание от якоря генератора через выпрямители (рис. 129, *б*).

На рис. 130 представлен бортовой трехфазный синхронный генератор мощностью 7,5 *ква* с обмоткой якоря, размещенной на роторе. Корпус генератора стальной, моноблочного типа. Для крепления к приводному двигателю он имеет фланец с центрирующим буртиком. В корпусе располагается двенадцать полюсов с полюсными катушками обмотки возбуждения. Полюса снаб-

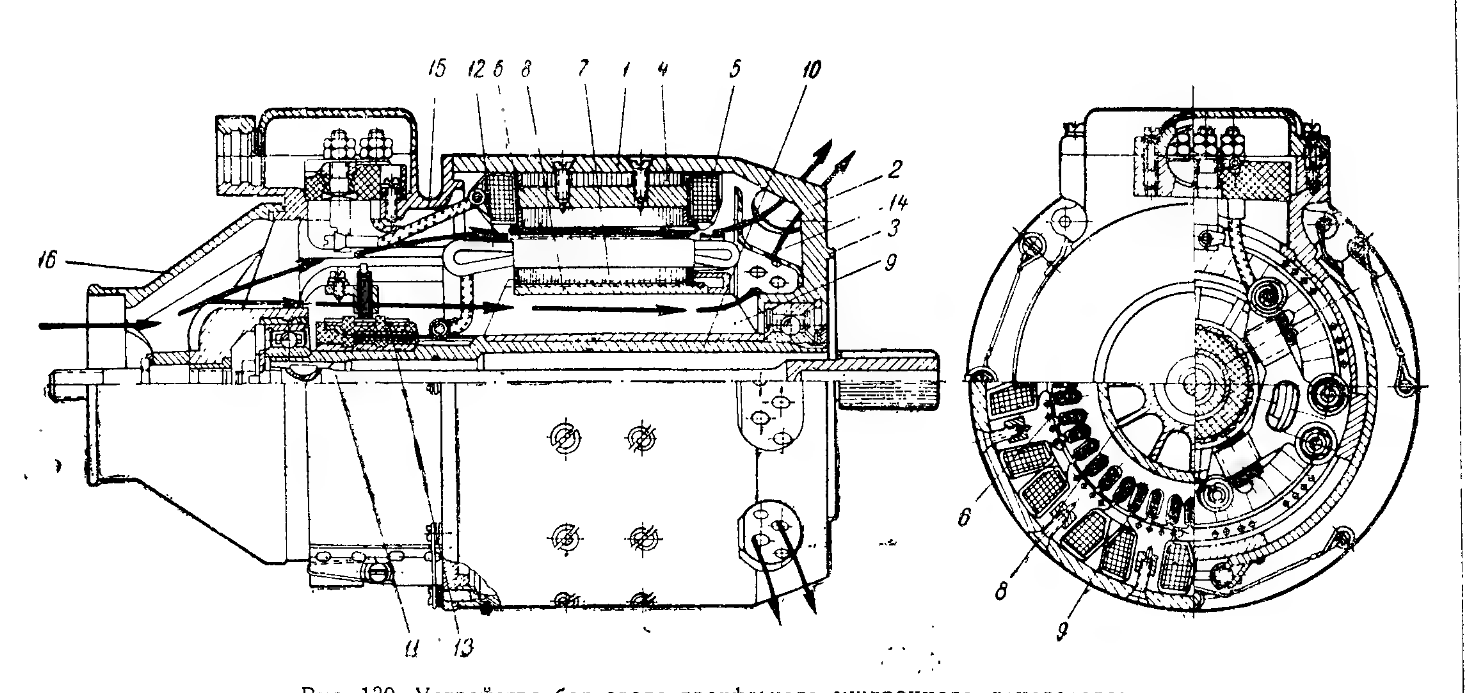



Рис. 130. Устройство бортового трехфазного синхронного генератора:
*1*—корпус; *2*—фланец; *3*—центрирующий буртик; *4*—полюс; *5*—полюсная катушка; *6*—успокоительная обмотка; *7*—пакет ротора; *8*—стальная втулка; *9*—ступица; *10*—полый вал; *11*—упругий вал; *12*—обмотка якоря; *13*—контактное кольцо; *14*—защитная решетка; *15*—подшипниковый щит; *16*—воздухозаборный колпак

жаются успокоительной обмоткой (см. § 86), состоящей из стержней, замкнутых соединительными пластинами. Пакет ротора набирается из листов электротехнической стали. Располагается он на стальной втулке. Втулка насаживается на ступицу, которая, в свою очередь, помещается на полый вал. Внутри полого вала находится упругий вал, через который якорь генератора приводится во вращение от приводного двигателя. Упругий вал обеспечивает эластичное соединение генератора с приводом.

В пазах ротора генератора размещается трехфазная якорная обмотка. Обмотка соединяется в звезду без выведенного нуля. Концы фаз обмотки припаиваются к контактным кольцам. Для предохранения обмоток от механических повреждений в корпусе устанавливается защитная решетка.

Щит генератора отливается из алюминиевого сплава. Внутри щита к специальным приливам крепятся щеткодержатели со щетками. На каждом контактном кольце располагаются пб две щетки, которые к контактным кольцам прижимаются посредством спиральных пружин. Снаружи на щите располагается коробка с выводными зажимами. Для подхода к щеткам в щите предусмотрены окна, которые закрываются защитной лентой.

Охлаждение генератора осуществляется путем продува через него забортного воздуха. Воздух через воздухозаборный колпак

*Таблица 7*

| Тип генератора | СГС-7,5Б | СГС-7,5В | СГС-7,5Г | СГС-15 | СГС-30Т | СГС-30Б |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Номинальная мощность, *ква* | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 15,0 | 30,0 | 30,0 |
| Номинальное напряжение, *в* | 120 | 208 | 208 | 208 | 208 | 208 |
| Номинальный ток, *а* . . . . | 36,0 | 20,8 | 20,5 | 42,0 | 83,5 | 83,5 |
| Скорость вращения, *об/мин* . . . . | 4000—9000 | 4000—9000 | 8000 | 6000 | 4500—8900 | 4200—9300 |
| Частота, *гц* . | 400—900 | 400—900 | 400 | 400 | 225—445 | 210—465 |
| Коэффициент мощности | 0,85 | 0,85 | 0,8 | 0,75 | 0,8 | 0,8 |
| К. п. д., % . . | 0,81 | 0,8 | 0,8 | 0,76 | 0,8 | 0,8 |
| Режим работы . . . . . | Продолжительный | | | | | |
| Вес не больше, *кг* . . . . | 16,1 | 15,5 | 16,5 | 18,5 | 30,5 | 30,0 |

поступает во внутренние полости генератора, омывает его нагретые части и выбрасывается наружу через окна в корпусе генератора.

Основные данные некоторых синхронных генераторов, применяемых на летательных аппаратах, приведены в таблице 7.

## § 83. ОБМОТКА ЯКОРЯ

Обмотка якоря является основной рабочей обмоткой синхронного генератора, которая должна обеспечить создание э. д. с. не только заданной величины, но и синусоидальной формы. Последнее требование имеет большое значение, так как при синусоидальной форме э. д. с. снижаются потери в генераторе и потребителях электрической энергии, уменьшается влияние линий передач на близлежащие линии связи и т. д.

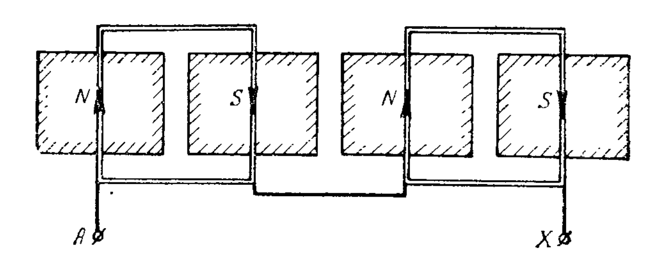



Рис. 131. Схема однофазной сосредоточенной обмотки якоря

Обмотка якоря синхронного генератора выполняется из отдельных элементов, называемых **секциями**, которые могут состоять из одного или нескольких витков. Активные стороны каждой секции располагается в двух пазах якоря над разноименными полюсами. Ширина секции, или первый частичный шаг обмотки, примерно равен полюсному делению ($y_1 \approx \tau$).

Одной из важных величин, которая связывает все основные параметры синхронного генератора, необходимые для выполнения обмотки якоря, является $q$ — **число пазов на полюс и фазу**;

$$q = \frac{Z}{2pm},$$

где $Z$ — число пазов в якоре,

$m$ — число фаз.

Если у однофазного синхронного генератора на полюс приходится всего один паз и, следовательно, одна активная сторона секции, т. е. $q = 1$, то обмотка будет **сосредоточенной** (рис. 131). Так как секции соединены между собой последовательно, то э. д. с.

однофазной обмотки будет равна сумме э. д. с. секций. Форма кривой э. д. с. в этом случае будет зависеть только от закона распределения магнитной индукции в воздушном зазоре машины. Однофазные сосредоточенные обмотки трудно разместить на якоре, поэтому в электрических машинах переменного тока обычно применяют распределенные обмотки.

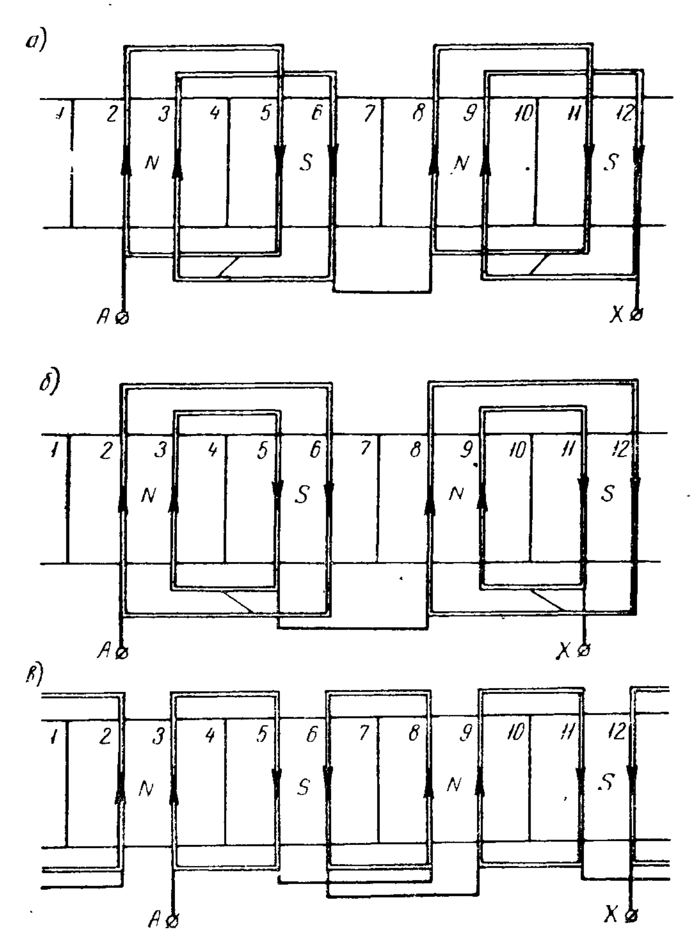



Рис. 132. Схемы однофазной распределенной обмотки якоря: а) первый способ выполнения обмотки; б) второй способ выполнения обмотки; в) третий способ выполнения обмотки

При распределенной обмотке на один полюс приходится два и больше пазов якоря, т. е. $q \geqslant 2$, что дает возможность лучше использовать поверхность якоря. Кроме того, распределенная обмотка позволяет получить э. д. с. по форме близкую к синусоиде даже в том случае, когда имеет место несинусоидальный закон измене-

ния магнитной индукции в воздушном зазоре, так как э. д. с. обмотки якоря получается в результате сложения э. д. с. отдельных секций, которые находятся в различных магнитных условиях.

Наряду с лучшим использованием стали якоря и проигрышем в величине э. д. с. распределенная обмотка якоря характеризуется повышенным расходом меди на изготовление секций. При большом числе пазов расход меди существенным образом увеличивается, в то время как выигрыш в величине э. д. с. будет невелик. В связи с этим в однофазных генераторах переменного тока в большинстве случаев используют только две трети всей поверхности якоря. Для этого равномерно по всей поверхности якоря вы-

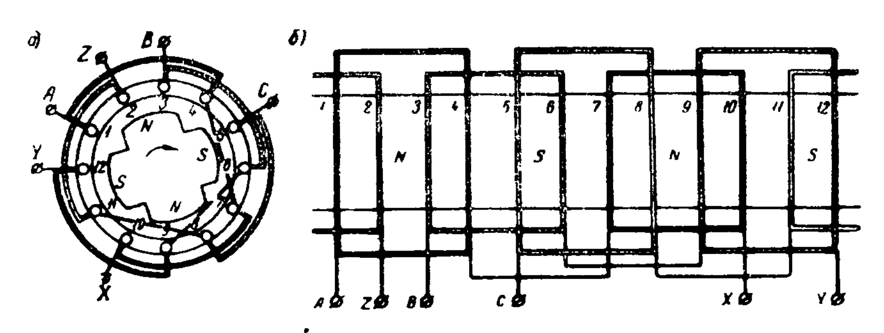



Рис. 133. Схема однослойной сосредоточенной обмотки якоря трехфазного синхронного генератора:
а) радиальная схема; б) развернутая схема

полняют полное число пазов, затем две трети пазов заполняют обмоткой, а в остальные пазы забивают деревянные клинья.

На рис. 132, *а* представлена схема однофазной распределенной обмотки якоря, имеющей два паза на полюс ($q = 2$). При таком выполнении обмотки лобовые части отдельных секций перекрещиваются, что создает затруднения при укладке секций в пазы, так как лобовые части секций приходится отгибать. Поскольку величина э. д. с. обмотки якоря не зависит от порядка, в котором складываются э. д. с. активных сторон секций, то стороны секций можно соединить так, как указано на рис. 132, *б* и *в*. Предпочтительнее, очевидно, будет вторая схема (рис. 132, *в*), где секции имеют наименьшую длину и одинаковые размеры.

Кроме рассмотренных однослойных обмоток якоря, в однофазных синхронных генераторах могут применяться и двухслойные обмотки. Однако в связи с трудностями крепления этих обмоток при использовании только двух третей пазов они в однофазных генераторах применяются редко.

Обмотки якоря трехфазных синхронных генераторов выполняются однослойными или двухслойными, причем последние применяются значительно чаще. Трехфазная однослойная обмотка представляет собой комбинацию трех однофазных обмоток, фазы

которых смещены одна относительно другой на одну треть двойного полюсного деления, т. е. на $\frac{2}{3}\tau$. На рис. 133 в качестве примера изображена схема трехфазной однослойной сосредоточенной обмотки, у которой число пазов на полюс и фазу $q=1$.

Двухслойные обмотки якоря машин переменного тока во многом похожи на обмотки якоря машин постоянного тока. Двухслойные обмотки якоря довольно часто выполняются с укороченным шагом, что дает возможность снизить расход меди и улучшить форму кривой э. д. с. генератора (см. § 84). Секции двухслойной обмотки имеют одинаковые размеры и поэтому изготовляются заранее на специальных шаблонах. Схема двухслойной обмотки трехфазного генератора для одной фазы приведена на рис. 134.

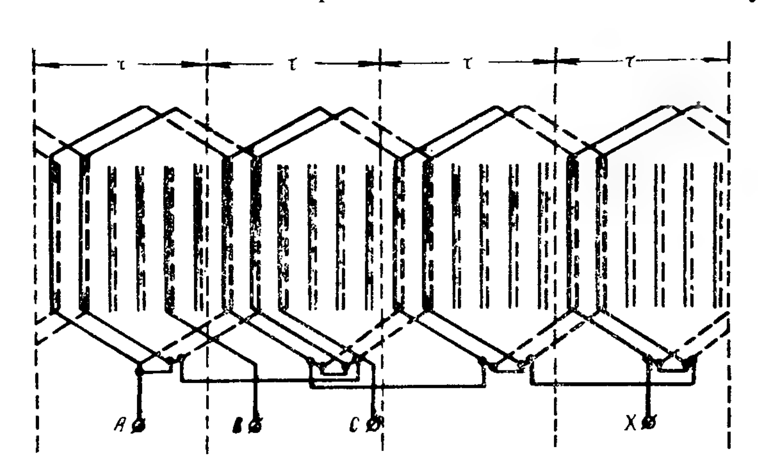



Рис. 134. Схема двухслойной обмотки якоря трехфазного синхронного генератора

## § 84. Э. Д. С. ОБМОТКИ ЯКОРЯ

Согласно закону электромагнитной индукции среднее значение э. д. с. в проводнике

$$E_{n\,cp} = B_{cp} l v.$$

Для практики интерес представляет действующее значение э. д. с., которое, как известно, может быть представлено следующим образом:

$$E_n = k_ф E_{n\,cp},$$

где $k_ф$ — так называемый коэффициент, учитывающий форму кривой э. д. с.

Если считать, что кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре генератора представляет собой синусоиду, то коэффициент $k_ф = 1{,}11$ и, следовательно,

$$E_п = 1{,}11 B_{ср} l v.$$

Скорость движения проводника относительно магнитного поля равна

$$v = \frac{\pi D_я n}{60}.$$

Так как $\pi D_я = 2p\tau$, то $v = 2\frac{pn}{60}\tau = 2f\tau$.

Подставляя значение скорости $v$ в формулу э. д. с., имеем:

$$E_п = 2{,}22 f B_{ср} l \tau.$$

В полученном выражении $B_{ср} l \tau = \Phi$ — магнитный поток полюса, поэтому

$$E_п = 2{,}22 f \Phi.$$

Виток имеет две активные стороны, которые располагаются на якоре под различными полюсами. Если первый частичный шаг обмотки $y_1$ соответствует полюсному делению $\tau$, т. е. обмотка выполнена с диаметральным шагом, то э. д. с. витка

$$E_в = 2E_п = 4{,}44 f \Phi.$$

При укороченном шаге э. д. с. витка

$$E_в = 4{,}44 k_у f \Phi,$$

где $k_у$ — коэффициент укорочения шага обмотки; $k_у < 1$

Секция обмотки якоря содержит $w_c$ витков, поэтому э. д. с ее будет равна

$$E_c = 4{,}44 k_у w_c f \Phi.$$

Как уже отмечалось выше, обмотка якоря синхронного генератора всегда выполняется распределенной. Секции обмотки размещаются равномерно вдоль полюсной дуги и соединяются между собой последовательно. Поскольку э. д. с. этих секций будут смещены друг относительно друга во времени, э. д. с. группы секций $E_{гр}$ будет определяться геометрической суммой э. д. с., наводимых в секциях. Определить величину этой э. д. с. можно из формулы

$$E_{гр} = 4{,}44 k_у k_р q w_c f \Phi,$$

где $q$ — число секций, приходящихся на полюс и фазу;

$k_р$ — коэффициент распределения обмотки, который равен отношению э. д. с. распределенной обмотки к э. д. с. сосредоточенной обмотки; $k_р < 1$.

Фаза обмотки якоря включает в себя несколько секционных групп, которые между собой обычно включаются последовательно. Число таких групп всегда равно числу пар полюсов $p$, поэтому э. д. с. фазы

$$E = 4{,}44 k_y k_p q p w_c f \Phi = 4{,}44 k_{об} w f \Phi.$$

Здесь $k_{об} = k_y k_p$ — обмоточный коэффициент обмотки якоря;

$w = q p w_c$ — число витков фазы.

Таким образом, формула э. д. с. синхронного генератора отличается от формулы э. д. с. трансформатора (см. § 56) только обмоточным коэффициентом. Это объясняется тем, что обмотка якоря синхронного генератора в отличие от обмоток трансформатора выполняется распределенной и с укороченным шагом.

Полученная формула определяет величину фазной э. д. с. генератора. Величина линейной э. д. с., как известно, зависит от схемы соединения фаз. Если обмотка якоря соединена звездой, то $E_л = \sqrt{3}E$, если треугольником, то $E_л = E$.

При выводе формулы э. д. с. мы предполагали, что кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре синхронного генератора имеет вид синусоиды. В действительности эта кривая несинусоидальна. Однако, как известно из математики, любую несинусоидальную периодическую симметричную кривую можно разложить на ряд синусоид нечетного порядка. Первая синусоида называется основной гармоникой. Она имеет тот же период $\tau$, что и действительная кривая. Остальные синусоиды (третья, пятая, седьмая и т. д.) называются высшими гармониками. Они имеют соответственно периоды $\tau_3 = \frac{1}{3}\tau$, $\tau_5 = \frac{1}{5}\tau$ и т. д.

На рис. 135,*а* показано разложение кривой магнитной индукции $B$ в ряд из трех гармоник: первой $B_1$, третьей $B_3$ и пятой $B_5$.

Магнитным индукциям $B_1$, $B_3$ и $B_5$ соответствуют магнитные потоки $\Phi_1$, $\Phi_3$ и $\Phi_5$, которые при вращении якоря наводят в проводниках якорной обмотки э. д. с. $E_1$, $E_3$ и $E_5$. Действующее значение э. д. с. якоря в этом случае равно

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2}.$$

Высшие гармоники э. д. с. оказывают небольшое влияние на величину э. д. с. генератора $E$, но сильно искажают форму кривой э. д. с.

Выясним, какое влияние на форму кривой э. д. с. оказывают третьи гармоники. Третьи гармоники э. д. с. имеют тройную частоту, поэтому можно написать:

$$e_{3A} = E_{3\,макс} \sin 3\omega t,$$

$$e_{3B} = E_{3\,макс} \sin 3(\omega t - 120°) = E_{3\,макс} \sin 3\omega t,$$

$$e_{3C} = E_{3\,макс} \sin 3(\omega t - 240°) = E_{3\,макс} \sin 3\omega t.$$

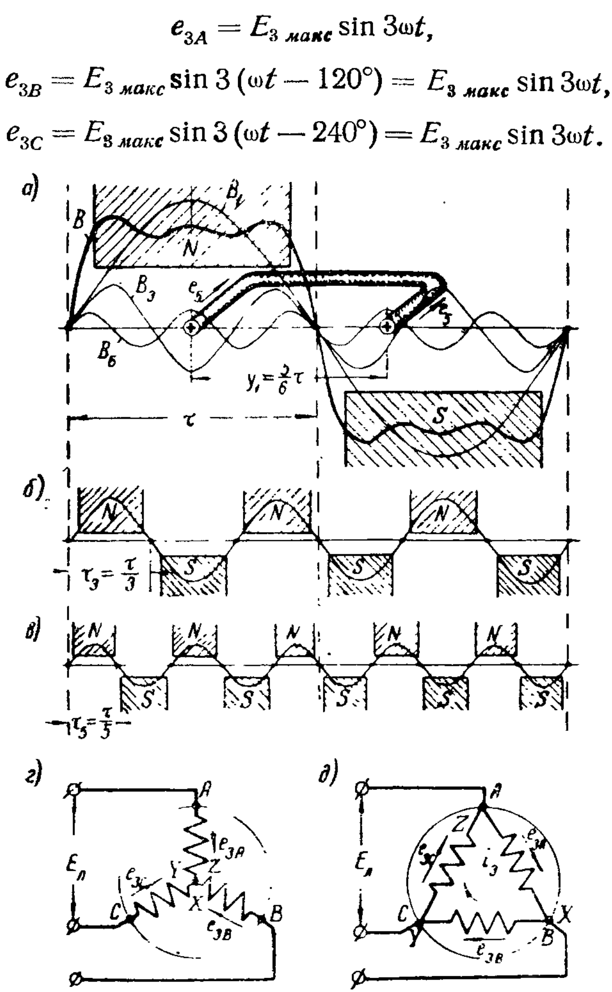



Рис. 135. Понятие о высших гармониках:
а) разложение кривой магнитной индукции в гармонический ряд; б) и в) модели индукторов, создающих третью и пятую гармоники индукции; г) и д) действие третьей гармоники э. д. с. при соединении обмотки якоря звездой и треугольником

Из полученных выражений видно, что в любой момент времени третьи гармоники э.д.с. $e_{3A}$, $e_{3B}$ и $e_{3C}$ равны по величине и совпадают по фазе, т. е. направлены от начала к концу соответствующей фазы или наоборот.

В случае соединения трехфазной обмотки якоря звездой третьи гармоники э. д. с. $e_{3A}$, $e_{3B}$ и $e_{3C}$ взаимно уравновешиваются (рис. 135,*г*), а при соединении обмотки якоря треугольником э. д. с. $e_{3A}$, $e_{3B}$ и $e_{3C}$ имеют одно направление (рис. 135,*д*) и создают в контуре *ABC* ток тройной частоты $i_3$, который, однако, не попадает во внешнюю сеть. Таким образом, независимо от схемы соединения обмотки якоря в линейном напряжении синхронного генератора третьи гармоники э. д. с. отсутствуют. Этот вывод относится и ко всем гармоникам, порядок которых кратен трем.

При соединении обмотки якоря треугольником ток $i_3$ дополнительно нагружает обмотку якоря, вследствие чего появляются дополнительные потери и усиливается нагрев электрической машины. Это явление нежелательное, поэтому обмотка якоря у большинства синхронных генераторов соединяется звездой.

Из оставшихся высших гармоник наибольшее значение имеют пятая и седьмая гармоники э. д. с. Чтобы уменьшить искажающее действие этих гармоник на кривую э. д. с., в синхронных генераторах применяются обмотки якоря с укороченным шагом. Например, при укорочении шага обмотки якоря, равном $1/5\tau$ (рис. 135,*а*), пятая гармоника э. д. с. полностью уничтожается, так как э.д.с. пятой гармоники $e_5$, наводимые в активных сторонах секции, будут равны по величине и направлены навстречу друг другу. При укорочении шага обмотки на $1/7\tau$ уничтожается седьмая гармоника э. д. с. Чтобы обеспечить ослабление одновременно пятой и седьмой гармоник э. д. с., шаг обмотки якоря обычно выбирают равным $y_1 = 0{,}8 \div 0{,}86\tau$, т. е. обмотка якоря выполняется с коэффициентом укорочения $k_y = 0{,}8 \div 0{,}86$.

## § 85. РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

В режиме холостого хода, когда нагрузка отключена, в генераторе имеет место только магнитное поле возбуждения, за счет которого в обмотке якоря наводится э. д. с.

При включении внешней цепи в якоре синхронного генератора появляется ток $I$, который создает м. д. с. якоря $F_я$. Поскольку эта м. д. с. образована системой трехфазных токов, она будет вращаться синхронно с индуктором генератора и, следовательно, в пространстве будет неподвижна относительно м. д. с. возбуждения $F_0$. В результате взаимодействия этих м. д. с. поле возбуждения генератора может искажаться, а также ослабляться или усиливаться в зависимости от величины и характера нагрузки. Действие м. д. с. якоря на магнитное поле возбуждения синхронного генератора называется **реакцией якоря**.

### 1. Реакция якоря при активной нагрузке

Предположим, что ток в фазе *AX* имеет максимальное значение и указанное на рис. 136,*а* направление, тогда, как известно, результирующая м. д. с. якоря $\dot{F}_я$ будет направлена по оси

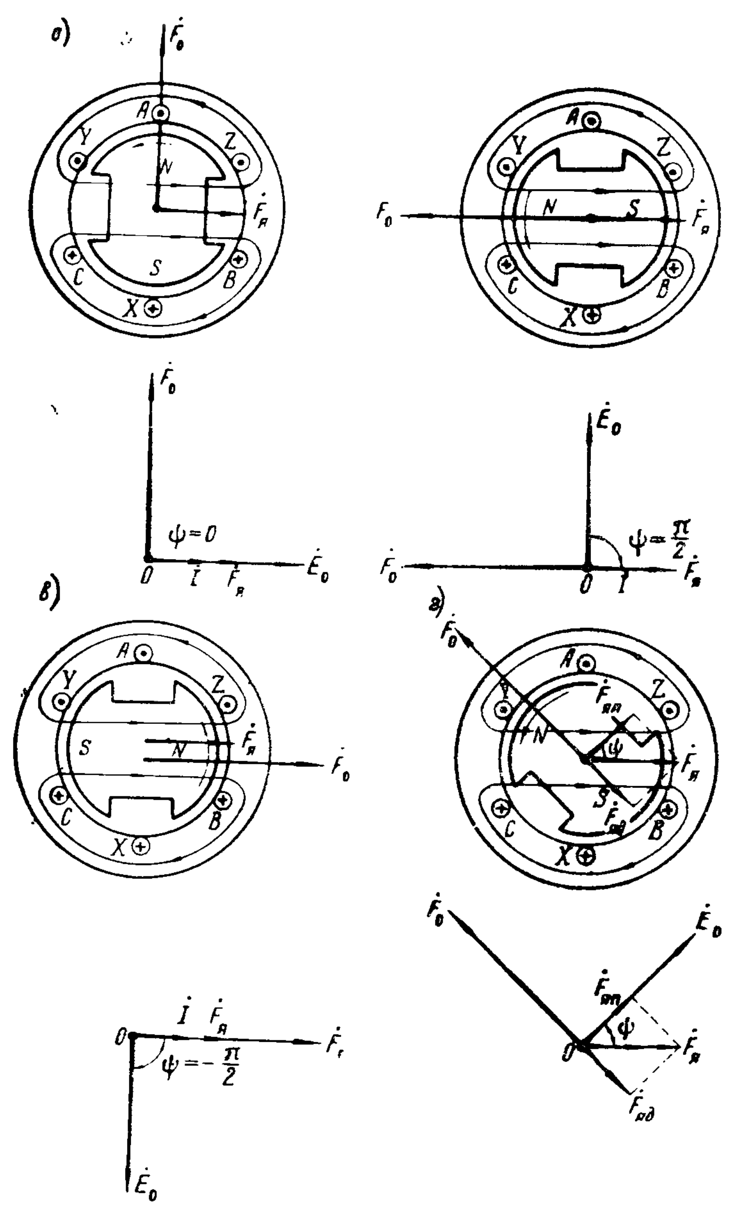



Рис. 136. Реакция якоря трехфазного синхронного генератора:
а) при активной нагрузке; б) при индуктивной нагрузке; в) при емкостной нагрузке; г) при активно-индуктивной нагрузке

этой фазы. Если угол сдвига между током нагрузки $\dot{I}$ и э. д. с. $\dot{E}_0$, которая наводится в обмотке якоря за счет основного потока возбуждения, равен нулю ($\psi = 0$), то ток и э. д. с. будут одновременно достигать максимальных значений. Поскольку максимум э. д. с. будет в фазе $AX$, против сторон этой фазы и должны располагаться полюса индуктора.

Из рис. 136,*а* видно, что м. д. с. якоря $\dot{F}_я$ направлена перпендикулярно м. д. с. полюсов $\dot{F}_0$, т. е. при активной нагрузке в синхронном генераторе имеет место поперечная реакция якоря, которая ослабляет магнитное поле генератора под одним краем полюса и усиливает под другим. При ненасыщенной магнитной системе это, как известно (см. § 15), приводит только к искажению магнитного поля возбуждения. В реальных условиях магнитная система генератора насыщена, поэтому ослабление магнитного поля под набегающим краем полюса не компенсируется усилением этого поля под сбегающим краем. Иначе говоря, поперечная реакция якоря оказывает размагничивающее действие на основное магнитное поле возбуждения генератора.

### 2. Реакция якоря при индуктивной нагрузке

Если ток нагрузки $\dot{I}$ отстает от э. д. с. $\dot{E}_0$ на угол $\psi = \frac{\pi}{2}$, то в фазе $AX$ он будет достигать максимального значения лишь через 1/4 периода после э. д. с., а это значит, что за то же время ось полюсов индуктора повернется по направлению вращения на 90° (рис. 136,*б*). В этом случае м. д. с. якоря $\dot{F}_я$ будет направлена встречно относительно м. д. с. поля возбуждения $\dot{F}_0$, следовательно, реакция якоря будет продольной и размагничивающей.

### 3. Реакция якоря при емкостной нагрузке

При опережающем токе нагрузки $\left(\psi = -\frac{\pi}{2}\right)$ м. д. с. якоря $\dot{F}_я$ совпадает по фазе с м. д. с. возбуждения $\dot{F}_0$, поэтому реакция якоря будет продольной и намагничивающей (рис. 136,*в*).

### 4. Реакция якоря при смешанной нагрузке

В случае смешанной активно-индуктивной нагрузки вектор м. д. с. якоря $\dot{F}_я$ отстает от вектора м. д. с. возбуждения $\dot{F}_0$ на угол $\alpha = 90° + \psi$ (рис. 136,*г*). Чтобы оценить влияние реакции якоря на поле возбуждения, м. д. с. якоря $\dot{F}_я$ можно разложить на составляющие: продольную $\dot{F}_{яd}$ и поперечную $\dot{F}_{яп}$. Продольная со-

ставляющая $\dot{F}_{яд}$ находится в противофазе м. д. с. $\dot{F}_0$, поэтому она оказывает размагничивающее действие на основное поле возбуждения генератора. За счет поперечной составляющей $\dot{F}_{яп}$ магнитное поле генератора искажается, а при насыщенной магнитной системе и ослабляется.

## § 86. ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ ЯКОРЯ ОДНОФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

В однофазном синхронном генераторе при прохождении тока по обмотке якоря возникает пульсирующее магнитное поле, которое в случае синусоидального тока изменяется во времени по синусоидальному закону.

Пульсирующий магнитный поток, как известно (см. § 80), можно разложить на два потока, имеющих половинную амплитуду и вращающихся в разные стороны с одинаковой скоростью $n = \frac{60f}{p}$. Если обмотка якоря размещена на роторе, то прямой магнитный поток, вращающийся в ту же сторону, что и ротор, будет иметь двойную скорость относительно магнитной системы генератора, а обратный поток, вращающийся навстречу ротору относительно магнитной системы, будет неподвижным. Если обмотка якоря размещена на статоре, то прямой магнитный поток относительно полюсов ротора будет неподвижным, а обратный поток будет вращаться со скоростью $2n$.

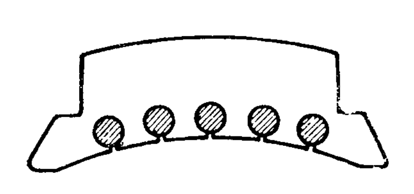


Рис. 137. Полюс с успокоительной (демпферной) обмоткой

За счет магнитного потока, имеющего двойную скорость вращения, в обмотке возбуждения синхронного генератора будет наводиться ток двойной частоты, который вызовет в ней дополнительные потери. Это приведет к снижению коэффициента полезного действия и увеличению нагрева генератора. Чтобы уменьшить вредное действие этого потока, в полюсных наконечниках генератора укладывается так называемая успокоительная или демпферная обмотка. Эта обмотка выполняется из стержней, которые соединяются между собой шинками или кольцами. Внешне такая обмотка напоминает короткозамкнутую клетку (рис. 137).

Относительно магнитного потока, имеющего двойную скорость вращения, успокоительная обмотка представляет собой как бы вторичную обмотку замкнутого накоротко трансформатора. М. д. с. вторичной обмотки трансформатора, как известно, действует навстречу м. д. с. первичной обмотки. Точно так же в однофазном синхронном генераторе действует и успокоительная обмотка. Если

ее сопротивление мало, то магнитный поток, создаваемый ею, практически полностью компенсирует магнитный поток якоря, вращающийся с двойной скоростью. Следовательно, при рассмотрении реакции якоря однофазного синхронного генератора, имеющего успокоительную обмотку, можно считать, что магнитный поток якоря неподвижен относительно магнитной системы генератора, а амплитуда этого потока равна половине амплитуды потока, создаваемого обмоткой якоря. В зависимости от характера нагрузки реакция якоря у однофазного синхронного генератора может быть поперечной (активная нагрузка), продольной размагничивающей (индуктивная нагрузка) или продольной намагничивающей (емкостная нагрузка).

Успокоительная обмотка выполняется не только у однофазных, но и у трехфазных синхронных генераторов. Делается это для компенсации магнитного потока реакции якоря, имеющего двойную скорость вращения, который появляется при несимметричной нагрузке трехфазного генератора.

## § 87. УПРОЩЕННАЯ ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА Э. Д. С. ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

В режиме холостого хода за счет м. д. с. индуктора в синхронном генераторе создается магнитный поток $\Phi_0$, который наводит в обмотке якоря э. д. с. $E_0$. Напряжение на зажимах генератора в этом случае равно его э. д. с. ($U = E_0$).

При включении нагрузки по обмотке якоря начинает протекать ток, который создает свой магнитный поток $\Phi_я$. Часть этого потока (поток реакции якоря) $\Phi_{ря}$ замыкается через ротор и, следовательно, оказывает влияние на магнитное поле генератора. Остальная часть потока $\Phi_р$ проходит только через воздушный зазор и является потоком рассеяния. Пространственное расположение потоков в генераторе для случая активно-индуктивной нагрузки дано на рис. 138,*а*. Оба эти потока $\Phi_{ря}$ и $\Phi_р$ пропорциональны току нагрузки $I$ и совпадают с ним по фазе.

Векторная диаграмма э. д. с. строится для одной фазы равномерно нагруженного генератора (рис. 138,*б*). Предположим, что магнитные потоки, создаваемые индуктором $\Phi_0$ и якорем $\Phi_{ря}$ и $\Phi_р$, действуют независимо друг от друга и наводят в обмотке якоря генератора соответственно э. д. с. $E_0$, $E_{ря}$ и $E_р$. Каждая из этих э. д. с. отстает от индуктирующего ее магнитного потока на угол 90°. Если магнитная система генератора ненасыщена, то магнитный поток $\Phi$, индуктирующий э. д. с. $E$ генератора при нагрузке, равен геометрической сумме потоков $\Phi_0$ и $\Phi_{ря}$. Вектор этой э. д. с., равный $\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ря}$, отстает от вектора потока $\Phi$ на угол 90°.

Для синхронного генератора справедливо следующее уравнение равновесия э. д. с.:

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_{ря} + \dot{E}_р = \dot{U} + \dot{I}r \quad \text{или} \quad \dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ря} + \dot{E}_р - \dot{I}r,$$

где $r$ — активное сопротивление фазы обмотки якоря.

Из этого уравнения видно, что для определения напряжения синхронного генератора $\dot{U}$ необходимо произвести геометрическое сложение векторов э. д. с. $\dot{E}_0$, $\dot{E}_{ря}$, $\dot{E}_р$ и вектора активного падения напряжения в обмотке якоря $\dot{I}r$, который следует

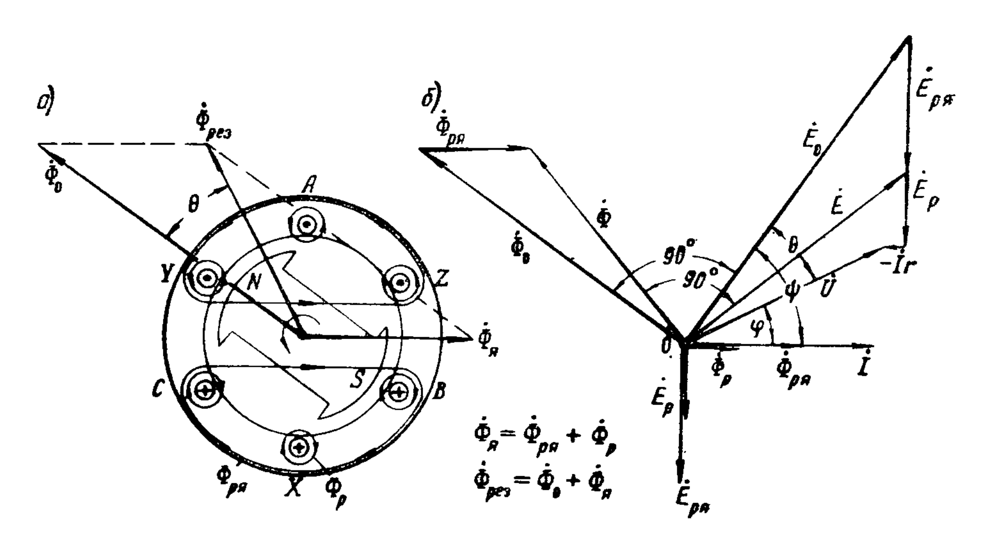



Рис. 138. Векторная диаграмма э. д. с. синхронного генератора: а) магнитные потоки синхронного генератора при нагрузке; б) векторная диаграмма э. д. с.

откладывать из конца вектора $\dot{E}_р$ в направлении, противоположном вектору тока нагрузки $\dot{I}$.

При построении векторной диаграммы э. д. с. $E_{ря}$ и $E_р$ удобнее рассматривать как падения напряжения в обмотке якоря:

$$E_{ря} = x_{ря}I \quad \text{и} \quad E_р = x_рI,$$

где $x_{ря}$ и $x_р$ — индуктивные сопротивления.

Так как э. д. с. $\dot{E}_{ря}$ и $\dot{E}_р$ совпадают между собой по фазе, то с целью упрощения диаграммы э. д. с. эти векторы обычно заменяют одним вектором $\dot{E}_я$, который направлен перпендикулярно вектору тока нагрузки $\dot{I}$. Э. д. с. $\dot{E}_я = \dot{I}x$, где коэффициент пропорциональности $x$ в этом случае представляет собой общее индуктивное сопротивление фазы генератора, которое назы-

вается синхронным реактивным сопротивлением. Таким образом, напряжение на зажимах генератора при нагрузке будет равно

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_я - \dot{I}r.$$

Исходными данными для построения векторной диаграммы являются: $U_н$, $I_н$, $\cos\varphi$, $x$ и $r$.

Порядок построения векторной диаграммы э. д. с. следующий. Откладываем в горизонтальном направлении вектор номинального тока нагрузки $\dot{I}_н$ и под углом $\varphi$ к нему проводим вектор номинального напряжения $\dot{U}_н$ (рис. 139,*а*). Если нагрузка актив-

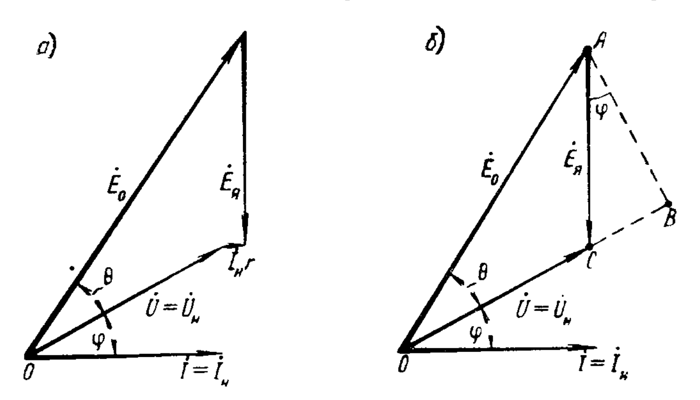



Рис. 139. Упрощенная векторная диаграмма э. д. с. синхронного генератора

но-индуктивная, напряжение должно упреждать ток, если активно-емкостная, ток должен упреждать напряжение. Затем, зная параметры электрической машины, определяем величины активного и индуктивного падений напряжения в якоре генератора. После этого из конца вектора $\dot{U}_н$ откладываем последовательно векторы $\dot{I}_н r$ и $\dot{E}_я$ и находим результирующий вектор э. д. с. генератора $\dot{E}_0$.

В условиях эксплуатации векторная диаграмма э. д. с. обычно используется для определения величины изменения напряжения на зажимах генератора при сбросе нагрузки:

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_н}{U_н} 100.$$

Полученную векторную диаграмму можно упростить, если пренебречь активным падением напряжения в якоре генератора $I_н r$, которое при номинальной нагрузке обычно не превышает 5—6% от его номинального напряжения (рис. 139, *б*).

При рассмотрении векторной диаграммы э. д. с. мы предполагали у генератора ненасыщенную магнитную систему. Однако опыт показывает, что эта диаграмма дает практически удовлетворительные результаты и для насыщенных синхронных генераторов, если синхронное реактивное сопротивление определено с учетом насыщения.

## § 88. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ МОЩНОСТЬ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Полезная мощность трехфазного синхронного генератора равна

$$P_2 = 3UI\cos\varphi.$$

Электромагнитная мощность $P_{эм}$, передаваемая в якорь синхронного генератора электромагнитным путем, отличается от полезной мощности $P_2$ на величину потерь в меди обмотки якоря. Однако эти потери очень малы, поэтому $P_{эм} \approx P_2$.

Чтобы выяснить, как зависит электромагнитная мощность $P_{эм}$ от параметров синхронного генератора, рассмотрим упрощенную векторную диаграмму э. д. с., представленную на рис. 139,*б*. Из векторной диаграммы видно, что перпендикуляр $AB$, опущенный из конца вектора $\dot{E}_0$ на продолжение вектора $\dot{U}$, равен

$$AB = AC\cos\varphi = Ix\cos\varphi.$$

Кроме того, из треугольника $OAB$ имеем:

$$AB = OA\sin\theta = E_0\sin\theta.$$

Следовательно,

$$Ix\cos\varphi = E_0\sin\theta,$$

откуда

$$I\cos\varphi = \frac{E_0}{x}\sin\theta.$$

Подставив значение $I\cos\varphi$ в формулу мощности, получим

$$P_{эм} = 3\frac{UE_0}{x}\sin\theta.$$

Из полученной формулы видно, что электромагнитная мощность синхронного генератора зависит от величины угла $\theta$, который представляет собой временной сдвиг по фазе между э. д. с. $\dot{E}_0$ и напряжением $\dot{U}$. Однако этому углу можно дать и пространственное толкование. Действительно, э. д. с. $\dot{E}_0$ создается магнитным потоком индуктора $\dot{\Phi}_0$, а напряжение синхронного генератора $\dot{U}$ обусловливается результирующим магнитным по-

током машины $\dot{\Phi}_{рез}$, который при ненасыщенной магнитной системе равен геометрической сумме потока возбуждения и потока якоря:

$$\dot{\Phi}_{рез} = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_я = \dot{\Phi}_0 + \dot{\Phi}_{ря} + \dot{\Phi}_р .$$

Так как векторы $\dot{E}_0$ и $\dot{U}$ сдвинуты во времени друг относительно друга на угол $\theta$, то в пространстве ось результирующего магнитного потока $\dot{\Phi}_{рез}$ будет смещена относительно оси потока индуктора $\Phi_0$ также на угол $\theta$ (см. рис. 138,*а*).

В случае постоянного напряжения на зажимах генератора мощность $P_2 \equiv I\cos\varphi$, поэтому перпендикуляр $AB$ (см. рис. 139,*б*) в некотором масштабе определяет величину активной мощности, отдаваемой синхронным генератором во внешнюю сеть.

## § 89. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Рабочие свойства синхронного генератора определяют следующие основные характеристики: характеристика холостого хода, внешние характеристики и регулировочные характеристики.

### 1. Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода представляет собой зависимость

$$E_0 = f(I_в) \text{ при } I = 0 \text{ и } n = \text{const}.$$

Вследствие гистерезиса характеристика холостого хода синхронного генератора не является однозначной кривой, а так же, как у генератора постоянного тока, имеет вид петли (рис. 140). Остаточный магнитный поток при отключенной обмотке возбуждения индуктирует э. д. с. остаточного магнетизма. Величина ее обычно не превышает 3% от номинального напряжения.

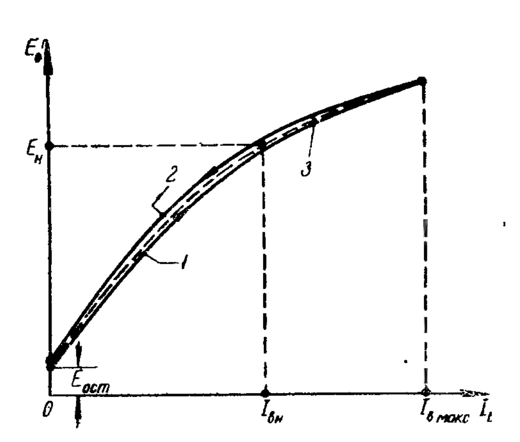


Рис. 140. Характеристика холостого хода синхронного генератора

При испытании синхронного генератора, как правило, снимают обе ветви петли холостого хода: одну при увеличении тока возбуждения от нуля до $I_{в\,макс}$ и другую при уменьшении его от $I_{в\,макс}$ до нуля. За опытную кривую принимают среднюю линию *3*, проведенную между восходящей *1* и нисходящей *2*

ветвями петли. Рабочая точка синхронного генератора, соответствующая его э. д. с. при номинальной нагрузке $E_н$, так же как у генераторов постоянного тока, находится на колене характеристики холостого хода. При постоянной скорости вращения э. д. с., наводимая в обмотке якоря, пропорциональна магнитному потоку, поэтому в другом масштабе характеристика холостого хода представляет собой кривую намагничивания $\Phi = f(I_в)$ синхронного генератора. Как уже указывалось, по характеристике холостого хода можно судить о степени насыщения стали магнитной системы машины. Кроме того, ее можно использовать для определения некоторых параметров синхронного генератора.

## 2. Внешние характеристики

Внешняя характеристика представляет собой зависимость

$$U = f(I) \quad \text{при} \quad I_в = \text{const}, \ \cos\varphi = \text{const} \quad \text{и} \quad n = \text{const}.$$

Эту зависимость можно снимать при любом значении тока возбуждения, однако практическое значение имеют только две группы внешних характеристик.

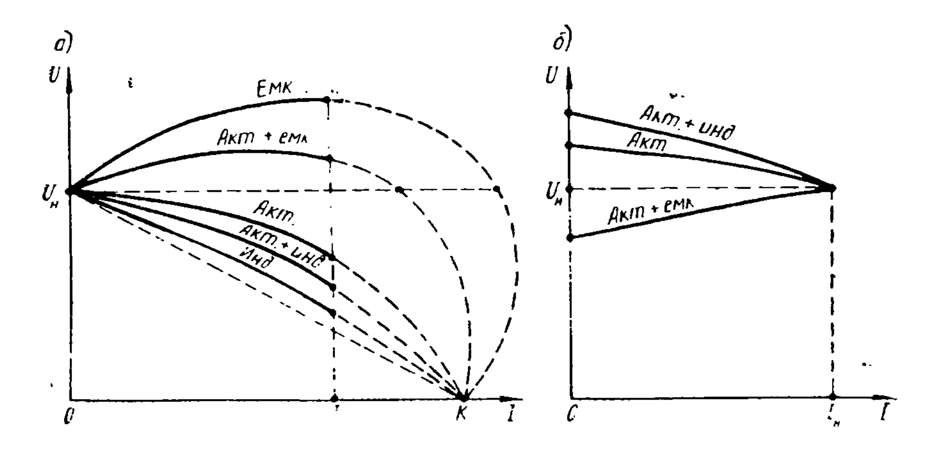



Рис. 141. Внешние характеристики синхронного генератора

Первая группа характеристик рассматривается при различных значениях коэффициента мощности и токе возбуждения $I_{в0}$, который обеспечивает номинальное напряжение при холостом ходе генератора. Если нагрузка активная, то с ростом тока $I$ напряжение на зажимах генератора снижается вследствие увеличения падения напряжения в обмотке якоря и усиления размагничивающего действия поперечной реакции якоря (рис. 141, *а*). При активно-индуктивной нагрузке внешняя характеристика имеет более падающий характер, поскольку в генераторе, кроме поперечной, имеет место

продольная размагничивающая составляющая реакции якоря. При опережающем $\cos\varphi$ продольная составляющая реакции якоря оказывает намагничивающее действие на генератор, поэтому с увеличением нагрузки напряжение на зажимах генератора сначала несколько возрастает, а затем начинает убывать. При трехфазном коротком замыкании все внешние характеристики синхронного генератора пересекаются в одной точке $K$.

Вторая группа внешних характеристик рассматривается при различных $\cos\varphi$ и токе возбуждения $I_{вн}$, который соответствует номинальному режиму работы генератора. Снимается она при изменении тока нагрузки от $I = I_н$ до $I = 0$. В случае активной или активно-индуктивной нагрузки напряжение на зажимах синхронного генератора при уменьшении тока $I$ будет возрастать, а при активно-емкостной нагрузке — убывать (рис. 141,*б*).

Внешние характеристики, особенно снятые при $I_{вн} = \text{const}$, имеют большое значение для оценки рабочих свойств синхронного генератора, так как по ним можно судить о влиянии величины и характера нагрузки на напряжение генератора в условиях эксплуатации. Располагая этими характеристиками, можно, например, определить величину процентного изменения напряжения генератора:

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_н}{U_н} 100.$$

Основной внешней характеристикой синхронного генератора обычно считается кривая $U = f(I)$, снятая при $\cos\varphi = 0{,}8$ и активно-индуктивной нагрузке. При такой нагрузке $\Delta U$ у современных синхронных генераторов достигает 40 — 50%.

### 3. Регулировочные характеристики

Регулировочная характеристика представляет собой зависимость

$$I_в = f(I) \text{ при } U_н = \text{const}, \quad \cos\varphi = \text{const} \quad \text{и} \quad n = \text{const}.$$

Регулировочная характеристика показывает, как нужно изменять у синхронного генератора ток возбуждения, чтобы при изменении тока нагрузки и определенном коэффициенте мощности сохранить на его зажимах постоянное, обычно номинальное, напряжение. Примерный вид регулировочных характеристик синхронного генератора изображен на рис. 142. Как видно из графика, крутизна характеристик изменяется в зависимости от характера нагрузки. Чем индуктивнее нагрузка и, следовательно, больше размагничивающее действие реакции якоря, тем круче вверх идет регулировочная характеристика. При активно-емкостной нагрузке продольная составляющая м. д. с. якоря подмагничивает генера-

тор, поэтому кривая $I_в = f(I)$ сначала опускается вниз, а затем при значительных токах нагрузки начинает загибаться вверх.

Регулировочные характеристики позволяют установить пределы регулирования тока возбуждения, необходимые для поддержа-

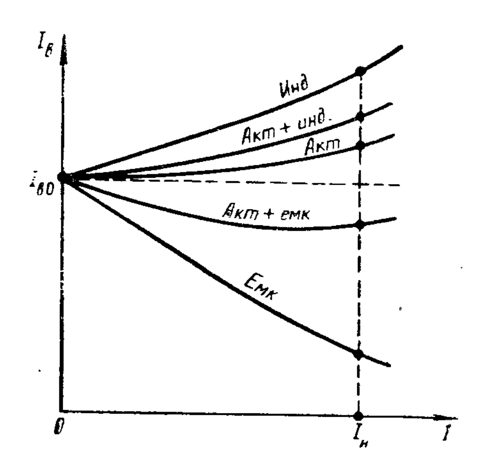



Рис. 142. Регулировочные характеристики синхронного генератора

ния постоянного напряжения на зажимах синхронного генератора при изменении его нагрузки в рабочем диапазоне, и правильно выбрать и рассчитать аппаратуру для регулирования напряжения генератора.

## § 90. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

В связи с неодновременной работой потребителей электрической энергии, нагрузка электрической сети обычно изменяется в широких пределах. Естественно, что использование для питания электрической сети только одного генератора не может обеспечить надежной работы потребителей электрической энергии, так как при выходе из строя генератора полностью прекращается электроснабжение всех потребителей.

При параллельной работе генераторов система электроснабжения становится не только более гибкой и надежной, но и повышается эффективность использования как отдельных генераторов, так и всей системы в целом. Если нагрузка невелика, часть генераторов может быть отключена. Это дает возможность увеличить нагрузку работающих генераторов, а следовательно, последние будут работать при более высоком коэффициенте полезного действия.

Осуществление параллельной работы синхронных генераторов связано с рядом трудностей, так как частота тока в якоре генера-

тора жестко связана со скоростью его вращения. При изменении скорости вращения одного из параллельно работающих генераторов в системе появляются токи разных частот, что вызывает биения тока и мощности, при которых параллельная работа синхронных генераторов становится невозможной. В связи с этим использование в качестве привода параллельно работающих синхронных генераторов основных двигателей летательного аппарата возможно только в том случае, если между генератором и его приводным двигателем будет промежуточное устройство постоянной скорости. Для этой цели применяются различного рода механические, гидравлические и электрические муфты. Однако они имеют значительный вес и габариты и не отличаются высокой надежностью в работе. Отсутствие совершенных приводов постоянной скорости является одной из причин, препятствующих широкому внедрению переменного тока на современных летательных аппаратах.

## 1. Условия параллельного включения однофазных синхронных генераторов

При включении синхронных генераторов на параллельную работу (рис. 143, *а*) между ними не должны возникать уравнительные токи. Это требование может быть выполнено только в том

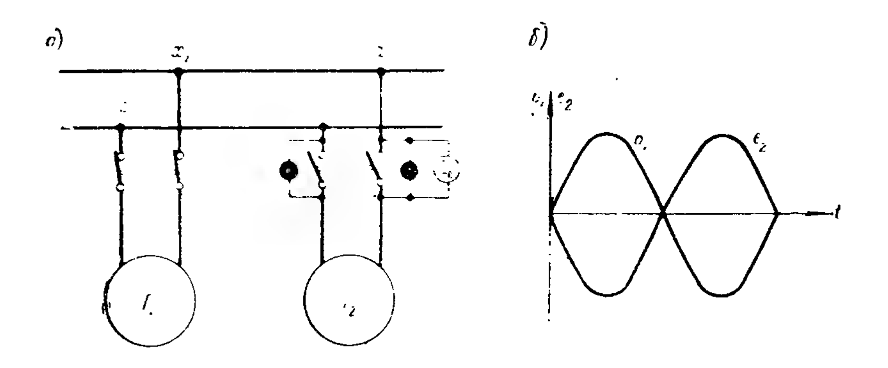


Рис. 143. Параллельная работа однофазных синхронных генераторов: а) схема включения; б) кривые напряжения и э. д. с.

случае, если в момент включения и в последующие моменты мгновенные значения э. д. с. приключаемого генератора и мгновенные значения напряжения работающего генератора будут равны и (при обходе по контуру $a_1a_2x_2x_1$) противоположны по направлению (рис. 143, *б*). Отсюда вытекают следующие условия параллельного включения однофазных генераторов:

а) действующие значения э. д. с. приключаемого генератора $E_2$ и напряжения работающего генератора $U_1$ должны быть равны;

б) вектор э. д. с. приключаемого генератора и вектор напряжения работающего генератора должны находиться в противофазе:

$$\dot{E}_2 = -\dot{U}_1;$$

в) частоты обоих генераторов должны быть равны:

$$f_2 = f_1.$$

Кроме того, предполагается, что оба генератора обладают практически синусоидальной формой кривой э. д. с.

Рассмотрим, к каким последствиям приводит несоблюдение одного из указанных выше условий параллельного включения синхронных генераторов.

1. Предположим, что при соблюдении всех прочих условий в момент включения э. д. с. приключаемого генератора $\dot{E}_2$ оказалась выше напряжения работающего генератора $\dot{U}_1$ на величину $\Delta\dot{U}$. Напряжение $\Delta\dot{U}$ вызовет в цепи генераторов уравнительный ток $\dot{I}_{yp}$. Так как в первом приближении величиной активных сопротивлений якорных обмоток генераторов можно пренебречь ($r_1 = r_2 \approx 0$), то

$$I_{yp} \approx \frac{\Delta U}{x_1 + x_2},$$

где $x_1$ и $x_2$ — синхронные индуктивные сопротивления генераторов.

Таким образом, уравнительный ток $I_{yp}$ практически является реактивным током, который для приключаемого генератора будет отстающим, индуктивным током, создающим продольную размагничивающую реакцию якоря; для работающего генератора ток будет опережающим, емкостным током и реакция якоря от этого тока будет подмагничивать генератор (рис. 144,*а*). В результате этого на зажимах параллельно включенных генераторов в случае их равной мощности установится некоторое среднее напряжение между $U_1$ и $E_2$.

Если э. д .с. $\dot{E}_2$ меньше напряжения $\dot{U}_1$, то вектор $\Delta\dot{U}$ будет совпадать по направлению с вектором $\dot{U}_1$ и, следовательно, уравнительный ток $\dot{I}_{yp}$ будет индуктивным для генератора *1* и емкостным для генератора *2* (рис. 144,*б*). Соответственно этому реакция якоря у первого генератора будет иметь размагничивающий характер, а у второго — намагничивающий. Это также приведет к выравниванию напряжения на зажимах параллельно включенных генераторов.

Несмотря на то, что наличие уравнительного тока не вызывает перераспределения активной мощности между генераторами и в момент включения не наблюдается механических толчков, пренебрегать выполнением этого условия не следует, так как

даже при сравнительно небольшом $\Delta U$ уравнительный ток $I_{ур}$ может достичь больших значений.

2. Если включение синхронного генератора последовало при несоблюдении только второго условия, т. е. роторы генераторов были сдвинуты в пространстве друг относительно друга на некоторый угол $\theta$, то за счет напряжения $\Delta\dot{U}$ в цепи генераторов возникнет реактивный уравнительный ток $\dot{I}_{ур}$, сдвинутый по фазе относительно напряжения $\Delta\dot{U}$ на угол примерно 90° (рис. 144,*в*). Как видно из диаграммы, уравнительный ток $\dot{I}_{ур}$ почти совпадает по фазе с э. д. с. $\dot{E}_2$ и, следовательно, для приключаемого

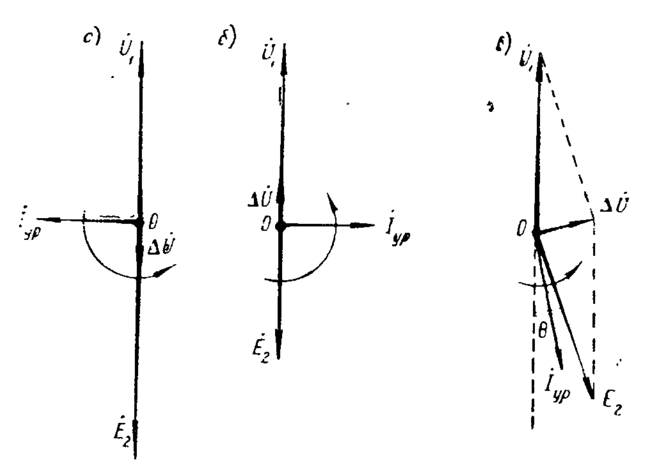



Рис. 144. Диаграммы э. д. с. параллельно включенных синхронных генераторов

генератора является практически активным генераторным током, внезапно нагружающим генератор.

Относительно напряжения $\dot{U}_1$ уравнительный ток $\dot{I}_{ур}$ находится почти в противофазе, а это значит, что для первого генератора $\dot{I}_{ур}$ является практически активным двигательным током. Таким образом, за счет появления уравнительного тока ротор первого генератора получает дополнительный механический толчок по вращению, а ротор второго — против вращения. В результате роторы генераторов займут одинаковое положение в пространстве и будут вращаться синхронно. Механические толчки, возникающие в момент параллельного включения синхронных электрических машин, могут привести к повреждению не только генераторов, но и приводных двигателей.

3. Положим, что включение генератора произведено при отсутствии равенства частот ($f_2 > f_1$) и соблюдении всех остальных условий. Это означает, что оси роторов сдвинуты в пространстве друг относительно друга на некоторый угол $\theta$, вели-

чина которого периодически изменяется. Рассматриваемый случай, очевидно, подобен предыдущему, но с той лишь разницей, что результирующее напряжение $\Delta\dot{U}$ все время будет изменяться по величине от нуля, когда напряжение $\dot{U}_1$ и э. д. с. $\dot{E}_2$ нахо-

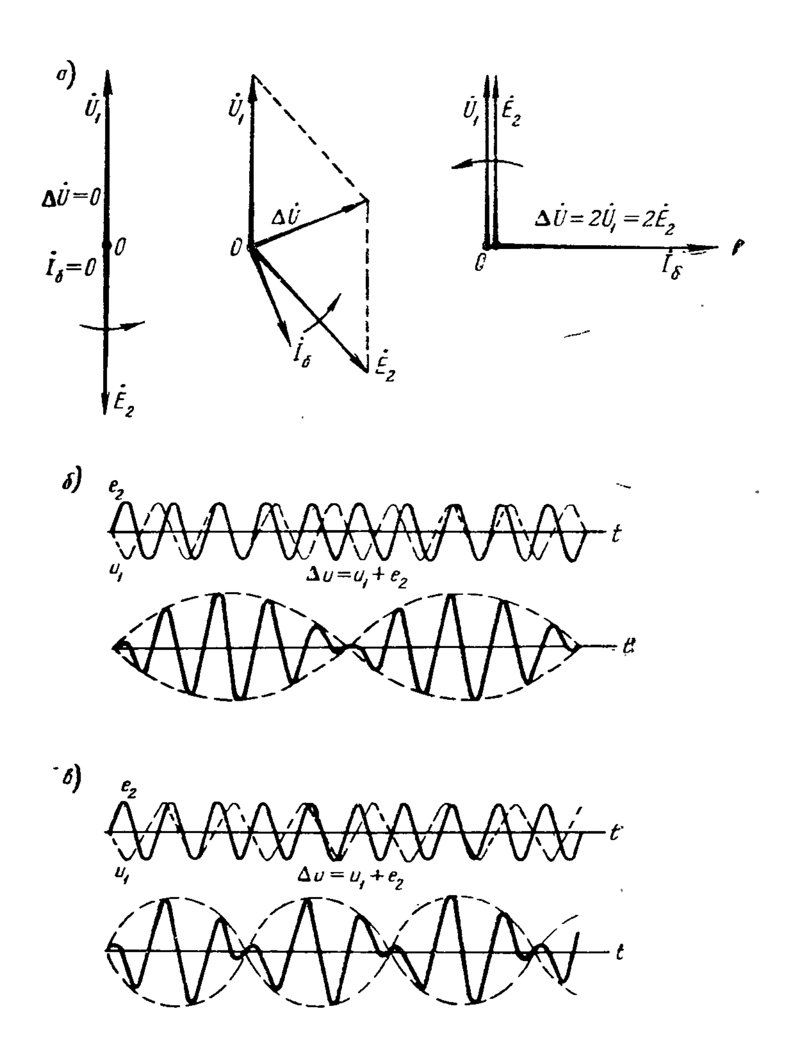



Рис. 145. Биения напряжения параллельно включенных синхронных генераторов

дятся в противофазе, до $\Delta\dot{U}=2\dot{U}_1=2\dot{E}_2$, когда $\dot{U}_1$ и $\dot{E}_2$ совпадают по фазе (рис. 145,*а*).

Таким образом, характер изменения результирующего напряжения $\Delta U$ имеет вид биений, частота которых тем меньше, чем

меньше отличаются друг от друга частоты генераторов (рис. 145,*б*), и тем больше, чем эта разность больше (рис. 145,*в*).

Биения напряжения вызывают соответствующие биения тока $\dot{I}_б$, который отстает от напряжения $\Delta\dot{U}$ на угол примерно 90°. Как видно из векторных диаграмм (рис. 145,*а*), ток биений $\dot{I}_б$ в отдельные моменты времени практически совпадает по направлению с э. д с. $\dot{E}_2$, поэтому его можно рассматривать как активный генераторный ток для генератора *2* и активный двигательный ток для генератора *1*. В моменты совпадения фаз э. д. с. $\dot{E}_2$ и напряжения $\dot{U}_1$ ток $\dot{I}_б$ практически является чисто индуктивным током.

Указанный характер тока $I_б$ является причиной периодических механических толчков на роторы генераторов, которые не только неблагоприятно отражаются на самих генераторах и их приводных двигателях, но при некоторых условиях могут явиться причиной расстройства работы всей системы. Следовательно, чтобы обеспечить наиболее легкие условия включения генераторов на параллельную работу, необходимо добиться наименьшей разности частот и включение производить в момент, когда сумма мгновенных значений $e_2$ и $u_1$ равна нулю.

Для проверки выполнения условий параллельного включения однофазных синхронных генераторов часто применяются лампы накаливания, которые включаются по схеме рис. 143, *а*. С помощью этих ламп, называемых обычно ф а з о в ы м и л а м п а м и, можно убедиться в отсутствии разности потенциалов между работающим и приключаемым генератором и, таким образом, определить момент, когда можно осуществить параллельное включение генераторов. Включение синхронных генераторов на параллельную работу производится в момент полного потухания фазовых ламп. Так как при напряжении, равном 25—30% номинального, фактически уже не наблюдается свечения ламп, для более точного определения момента включения генератора параллельно одной из фазовых ламп включают вольтметр и включение генератора производят в момент прохождения стрелки вольтметра через нуль.

## 2. Условия параллельного включения трехфазных синхронных генераторов

При включении на параллельную работу трехфазных синхронных генераторов, кроме выполнения указанных выше условий, необходимо обеспечить у обоих генераторов одинаковый порядок следования фаз. Иначе говоря, если у работающего генератора максимум э. д. с. сначала имеет место в фазе *A*, затем в фазе *B* и, наконец, в фазе *C*, то такой же порядок следования фаз $a \to b \to c$ должен быть у приключаемого генератора. Это исключит появление уравнительных токов при параллельном соединении трехфазных синхронных генераторов, если соблюдены остальные условия.

Несоблюдение требования одинакового порядка следования фаз при параллельном соединении синхронных генераторов влечет за собой сильные механические толчки на роторы генераторов, обусловленные уравнительными токами, которые не только препятствуют введению в синхронизм приключаемого генератора, но могут привести к выпадению из синхронизма параллельно работающих синхронных машин.

Простейшим синхронизирующим прибором являются фазовые лампы, которые могут быть включены либо по схеме рис. 146,*а*, либо по схеме рис. 146,*б*. Рассмотрим особенности первой схемы, которая получила название схемы „на потухание“. Если предположить, что порядок следования фаз у генераторов одинаков,

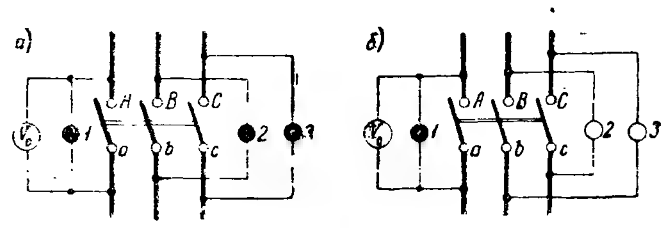



Рис. 146. Схемы включения ламп синхронизации:
а) на потухание; б) на вращение огня

но частоты разные ($f_2 \neq f_1$), то звезды векторов фазных напряжений работающего генератора и фазных э. д. с. приключаемого будут иметь различную угловую скорость. Совместим их нулевые точки и положим, что звезда напряжений ($A$, $B$, $C$) остается неподвижной; тогда звезда э. д. с. ($a$, $b$, $c$) будет вращаться относительно первой с угловой скоростью, равной разности их угловых скоростей (рис. 147,*а*). При этом направление вращения звезды $a$, $b$, $c$ зависит от того, какой из генераторов имеет большую угловую скорость. Поскольку все фазовые лампы включены между зажимами одноименных фаз, они будут одновременно загораться и одновременно потухать. Частота загорания и потухания ламп будет определяться разностью частот работающего и приключаемого генератора.

При различном порядке следования фаз вместо одновременного загорания и потухания лампы будут загораться и потухать поочередно. Для получения одинакового порядка следования фаз следует поменять местами два любых проводника, подходящих к рубильнику со стороны приключаемого генератора. Так как по фазовым лампам трудно правильно установить момент включения генератора, для этой цели используется вольтметр, присоединенный параллельно одной из ламп.

Если наблюдать за изменением напряжения на зажимах фазовых ламп, включенных по второй схеме (см. рис. 146,*б*), которая получила наименование схемы «на вращение огня», фазовые лампы будут загораться и потухать поочередно. Такая очеред-

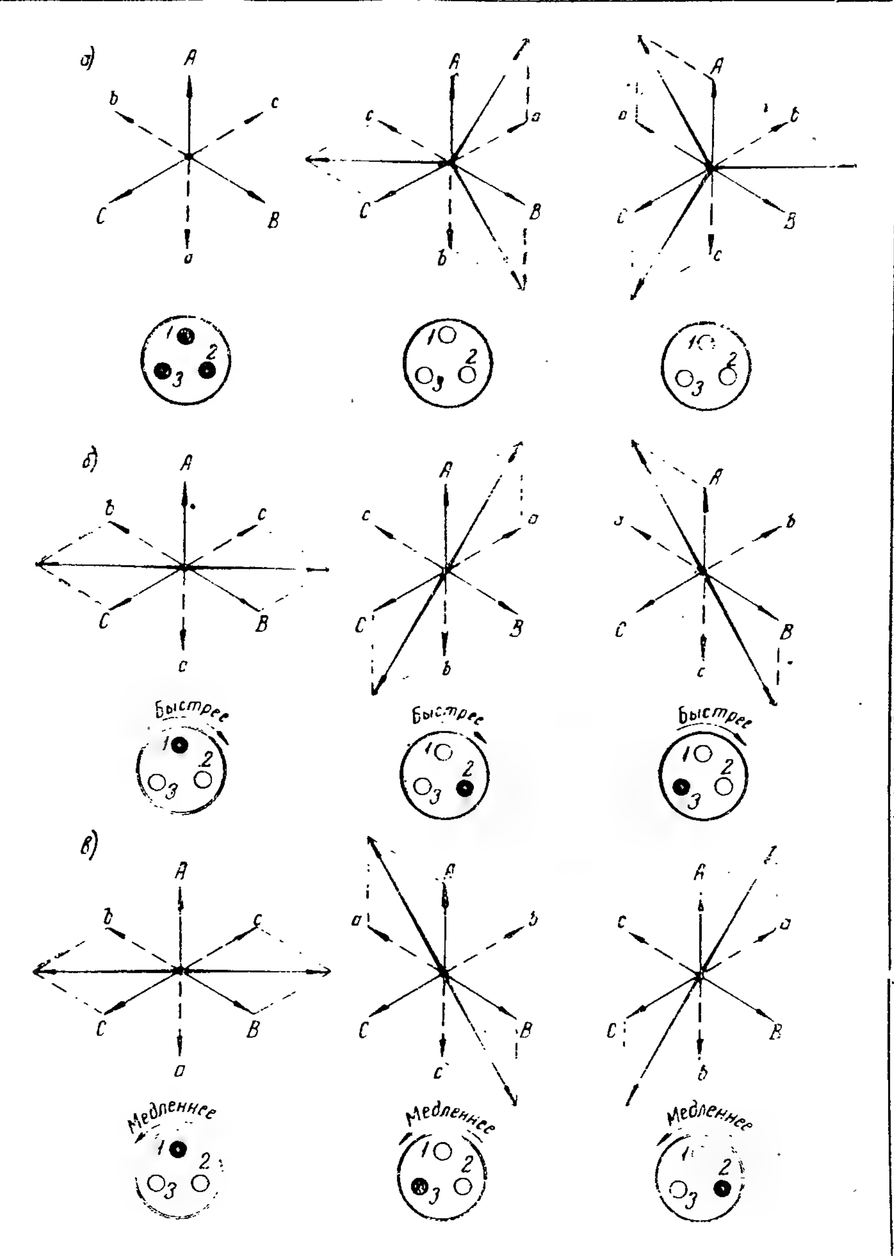



Рис. 147. Диаграммы э. д. с. при одинаковом порядке следования фаз и включении фазовых ламп:
а) на потухание; б) и в) на вращение огня

ность загорания и потухания ламп при расположении их по кругу создает впечатление вращения огня. При этом, если скорость вращения приключаемой машины выше синхронной, то вращение огня получается в одну сторону, например вправо (рис. 147, *б*), если скорость вращения ниже синхронной, то вращение огня будет в обратную сторону, т. е. влево (рис. 147, *в*). Таким образом, по направлению вращения огня можно судить о том, как нужно регулировать скорость вращения приключаемой машины, чтобы достигнуть синхронизма. Включение синхронной машины следует производить в тот момент, когда потухнет лампа, присоединенная к одноименным зажимам рубильника (на рис. 146, *б* лампа *1*), а две другие лампы будут гореть с одинаковой яркостью.

Если при включении фазовых ламп на вращение огня лампы загораются и потухают одновременно, то это говорит о различном порядке следования фаз у работающего и приключаемого генератора. Для получения необходимого соответствия достаточно поменять местами два любых проводника у рубильника со стороны приключаемого генератора.

Обычно фазовые лампы размещают в общем корпусе, покрытом сверху матовым стеклом, на котором имеются надписи «Медленнее» и «Быстрее». Такой прибор называют *ламповым синхроноскопом*.

Включение трехфазного синхронного генератора на параллельную работу с другим генератором, питающим внешнюю сеть, производится следующим образом. Подключаемый генератор приводится во вращение с синхронной скоростью и возбуждается до номинального напряжения. Затем посредством лампового синхроноскопа у него проверяется порядок следования фаз. Если порядок следования фаз у обоих генераторов совпадает, то после проверки выполнения всех перечисленных выше условий параллельного включения генераторы включаются на параллельную работу.

### 3. Перевод нагрузки с одного генератора на другой

Чтобы после включения на параллельную работу генератор принял на себя нагрузку, необходимо увеличить вращающий момент у привода. Для этого нужно увеличить количество газа или воздуха в приводной турбине или количество горючего в двигателе. В этом случае ротор приключенного генератора, получая ускорение в направлении вращения, поворачивается в пространстве на угол $\theta$ относительно ротора генератора, питающего нагрузку. В результате этого в цепи генераторов появляется активный уравнительный ток, который нагружает первый генератор и разгружает второй (рис. 148). Ток, проходя по обмотке якоря второго генератора, создает тормозной момент, в связи с чем приключенный генератор, приняв на себя часть нагрузки, будет продолжать вращаться с синхронной скоростью.

При переводе нагрузки одновременно с увеличением вращающего момента у приводного двигателя нагружаемого генератора нужно уменьшать вращающий момент у приводного двигателя разгружаемого генератора. Кроме того, следует регулировать возбуждение обоих генераторов, чтобы сохранить на зажимах сети постоянное напряжение. По мере увеличения момента у приводного двигателя, угол $\theta$ у приключенного генератора будет увеличиваться и активная мощность, отдаваемая им во внешнюю сеть, будет возрастать (см. § 88).

Об устойчивости синхронных генераторов при параллельной работе судят по **удельной синхронизирующей мощности**, которая представляет собой изменение электромагнитной мощности $P_{эм}$ на единицу угла $\theta$, т. е.

$$P_{сх}=\frac{dP_{эм}}{d\theta}.$$

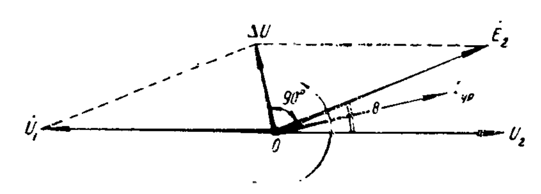



Рис. 148. Диаграмма э. д. с. параллельно работающих синхронных генераторов

Так как

$$P_{эм}=\frac{3UE_0}{x}\sin\theta,$$

то

$$P_{сх}=\frac{3UE_0}{x}\cos\theta,$$

т. е. для данного синхронного генератора при заданных $U$ и $E_0$ удельная синхронизирующая мощность пропорциональна $\cos\theta$.

При $\theta=0$, когда электромагнитная мощность синхронного генератора равна нулю, удельная синхронизирующая мощность будет максимальной. Наибольшего значения электромагнитная мощность синхронного генератора достигает при $\theta=90°$. Однако в этом случае удельная синхронизирующая мощность равна нулю и, следовательно, синхронный генератор не может работать параллельно с другими генераторами.

При номинальной нагрузке угол $\theta$ у синхронных генераторов обычно не превышает 15 — 25°, что обеспечивает им довольно высокую перегрузочную способность.

---

# СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

## § 91. ПРИНЦИП ОБРАТИМОСТИ СИНХРОННЫХ МАШИН

Если генератор, работающий параллельно с сетью, полностью разгрузить и отсоединить от него приводной двигатель, то ротор его будет продолжать вращаться в том же направлении и с той же скоростью, т. е. произойдет переход синхронной машины из генераторного в двигательный режим. Это можно объяснить следующим образом.

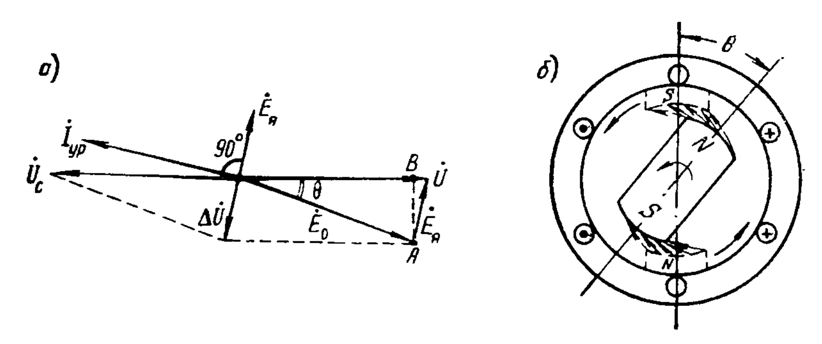



Рис. 149. Принцип действия трехфазного синхронного двигателя

После того как генератор будет полностью разгружен, э. д. с. $\dot{E}_0$, наводимая в его обмотке статора, будет равна по величине и противоположна по направлению напряжению сети $\dot{U}_c$. При отсоединении приводного двигателя от генератора ротор синхронной машины в первый момент несколько отстанет от вращающегося магнитного поля. В результате этого появляется разность напряжений $\Delta\dot{U}$, которая вызывает в цепи уравнительный ток $\dot{I}_{ур}$. Как видно из векторной диаграммы (рис. 149,*а*), этот ток имеет активную составляющую, совпадающую по направлению с вектором $\dot{U}_c$. Следовательно, синхронная машина начинает работать двигателем и потребляет из сети активную мощность, которая и обеспечивает создание необходимого вращающего момента. Величина активной мощности, как известно, пропорциональна перпендикуляру *AB*, опущенному из конца вектора э. д. с. $\dot{E}_0$ на вектор напряжения $\dot{U}$.

Ток $I_{ур}$, протекая по обмотке статора машины, создает магнитный поток $Ф_я$. Этот поток наводит в обмотке статора э. д. с. $E_я$, которая вместе с э. д. с. $E_0$, создаваемой потоком возбуждения, будет уравновешивать напряжение сети:

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_я = \dot{U} = -\dot{U}_c.$$

При появлении на валу машины тормозного момента угол $\theta$ увеличивается, а следовательно, растет и мощность, потребляемая синхронной машиной из сети. Таким образом, синхронная машина, так же как любая другая электрическая машина, обладает принципом обратимости, т. е. может работать как в генераторном, так и в двигательном режиме.

Наглядное представление о принципе работы синхронного двигателя дает рис. 149, *б*. Здесь вращающееся магнитное поле, создаваемое обмоткой статора, представлено в виде двух вращающихся полюсов. Между этими полюсами и соответствующими полюсами ротора существуют магнитные связи, за счет которых ротор вращается синхронно с полем статора. Вследствие сопротивления вращению оси полюсов несколько смещены друг относительно друга, что обусловливает появление касательной составляющей силы магнитного притяжения разноименных полюсов, которая и создает вращающий момент двигателя.

При увеличении нагрузки на валу ротор двигателя несколько поворачивается относительно поля статора, в связи с чем натяжение магнитных силовых линий увеличивается и вращающий момент двигателя возрастает. Если чрезмерно перегрузить двигатель, то магнитная связь между полюсами нарушается и двигатель останавливается.

## § 92. ПУСК В ХОД СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Как видно из предыдущего, синхронный двигатель не обладает пусковым моментом, что является его существенным недостатком. Для пуска синхронного двигателя в ход ему нужно предварительно сообщить скорость вращения, близкую к синхронной. Это может быть сделано либо при помощи дополнительного двигателя, который на время пуска сочленяется с валом синхронного двигателя и разгоняет его до нужной скорости вращения, либо путем применения специальной пусковой обмотки, размещенной на полюсах ротора, которая обеспечивает двигателю асинхронный пуск.

Первый способ пуска отличается малой экономичностью и громоздкостью установки, кроме того, вследствие ограниченной мощности у дополнительного двигателя он позволяет призводить пуск синхронного двигателя при небольшой нагрузке на валу. В качестве дополнительного двигателя могут быть использованы: асинхронный двигатель, двигатель постоянного тока или возбудитель самого синхронного двигателя, если он имеется на валу синхронной машины.

Второй способ пуска в настоящее время получил самое широкое применение. Пусковая обмотка у синхронного двигателя выполняется в виде беличьей клетки, которая размещается в пазах полюсов ротора. При включении обмотки статора в сеть в машине создается вращающееся магнитное поле, которое наводит в пусковой обмотке э. д. с. Поскольку пусковая обмотка замкнута

накоротко, по ней протекает ток. В результате взаимодействия тока с вращающимся магнитным полем создается вращающий момент, за счет которого ротор синхронного двигателя приходит во вращение со скоростью, близкой к синхронной. После включения питания обмотки возбуждения синхронный двигатель втягивается в синхронизм и начинает вращаться с синхронной скоростью.

Для того чтобы уменьшить величину пускового тока, иногда снижают напряжение, подводимое к обмотке статора синхронного двигателя в начале пуска. Для этой цели обычно используют автотрансформаторы.

В тех случаях, когда питание синхронного двигателя осуществляется от автономного генератора, допускающего регулировку частоты, пуск синхронного двигателя может быть произведен путем постепенного увеличения частоты питающего генератора.

Синхронные двигатели применяются значительно реже асинхронных, что объясняется главным образом отсутствием у них пускового момента. Обычно их используют в качестве синхронных компенсаторов (см. § 94), а также в тех приводных устройствах, где требуется постоянная скорость вращения независимо от величины нагрузки на валу.

## § 93. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ ДВИГАТЕЛЯ

Электромагнитная мощность трехфазного синхронного двигателя, передаваемая с помощью вращающегося магнитного поля со статора на ротор, равна

$$P_{эм} = P_1 - 3I^2r,$$

где $P_1$ — мощность, потребляемая двигателем из сети;

$3I^2r$ — потери в меди статора.

Потери в меди статора обычно ничтожно малы, поэтому $P_{эм} \approx P_1$. Если электромагнитную мощность выразить через параметры синхронной машины так же, как это было сделано выше для синхронного генератора (см. § 88), то можно получить:

$$P_{эм} = 3\frac{U_c E_0}{x}\sin\theta.$$

Здесь угол $\theta$ в отличие от синхронного генератора будет отрицательным. Это означает, что синхронная машина не отдает, а потребляет мощность из сети.

Вращающий момент синхронного двигателя

$$M = \frac{P_{эм}}{\Omega} = \frac{3U_c E_0}{\frac{2\pi n}{60}x}\sin\theta$$

или

$$M = c_M \sin\theta$$

Таким образом, вращающий момент синхронного двигателя изменяется пропорционально $\sin\theta$.

При $\theta = 90^\circ$ вращающий момент $M = M_{макс}$, где $M_{макс}$ — максимальный, или опрокидывающий, момент двигателя.

Если тормозной момент больше опрокидывающего момента, то двигатель останавливается. Обычно при номинальном режиме угол $\theta$ не превышает $20 - 30^\circ$, что обеспечивает двигателю высокую перегрузочную способность.

## § 94. РАБОТА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОСТОЯННОМ МОМЕНТЕ НА ВАЛУ И ИЗМЕНЕНИИ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ

Чтобы выяснить, какие физические явления протекают в синхронном двигателе при постоянном моменте на валу и изменении тока возбуждения, рассмотрим упрощенную векторную диаграмму синхронного двигателя (рис. 150).

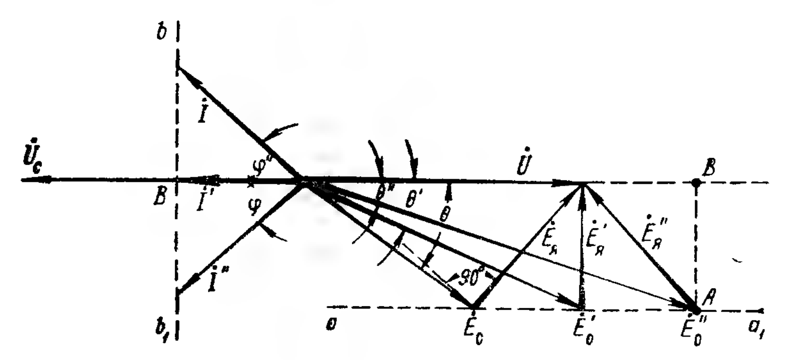


Рис. 150. Упрощенная векторная диаграмма синхронного двигателя

Известно, что напряжение сети $U_c$, приложенное к зажимам двигателя, уравновешивается суммой э. д. с.

$$\dot{E}_0 + \dot{E}_я = \dot{U} = -\dot{U}_c,$$

где $\dot{E}_0$ — э. д. с., наводимая в обмотке якоря за счет магнитного потока возбуждения;

$\dot{E}_я$ — э. д. с., наводимая в этой же обмотке за счет потока, создаваемого током якоря.

Так как момент сопротивления на валу двигателя не изменяется, а перпендикуляр, опущенный из конца вектора $\dot{E}_0$ на направление вектора $\dot{U}$, пропорционален активной мощности синхронной машины, то при изменении величины тока возбуждения $I_в$ конец вектора $\dot{E}_0$ будет скользить по прямой $aa_1$, параллельной вектору $\dot{U}$.

При постоянной нагрузке на валу активная мощность, потребляемая двигателем из сети, равна:

$$P_1 = 3U_cI\cos\varphi = \text{const},$$

откуда

$$I\cos\varphi = \frac{P_1}{3U_c} = \text{const}.$$

Иначе говоря, при изменении тока $I_в$ величина активной составляющей тока двигателя не изменяется. Следовательно, геометрическим местом точек конца вектора тока $\dot{I}$ является прямая $bb_1$, перпендикулярная вектору напряжения $\dot{U}_c$.

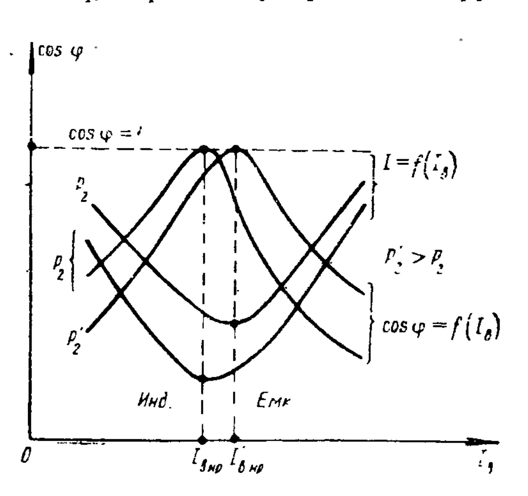



Рис. 151. U-образные характеристики синхронного двигателя

Предположим, что при некотором токе возбуждения $I_в$ э. д. с., наводимая в обмотке якоря за счет основного потока возбуждения, будет $\dot{E}_0$; э. д. с., индуктируемая в обмотке якоря за счет потока якоря, будет $\dot{E}_я$. В сумме эти э. д. с., равные $\dot{U}$, уравновешивают напряжение сети $\dot{U}_c$. Поток якоря создается током $\dot{I}$, поэтому вектор этого тока упреждает э. д. с. $\dot{E}_я$ на угол 90° (см. рис. 150). Если увеличить значение тока в обмотке возбуждения, то возрастет э. д. с., индуктируемая в обмотке якоря за счет основного магнитного потока. Вследствие инерции вращающихся частей в первый момент после изменения тока $I_в$ угол между осью поля статора и осью поля ротора (угол θ) не изменится, поэтому электромагнитная мощность синхронного двигателя $P_{эм} \equiv E_0 \sin\theta$ станет больше полезной мощности на валу $P_2$. В результате этого ротор двигателя получит некоторое ускорение и угол θ будет уменьшаться. По мере уменьшения угла θ электромагнитная мощность двигателя $P_{эм}$ будет падать. Уменьшение $P_{эм}$ будет продолжаться до тех пор, пока она не достигнет величины $P_2$, т. е. пока снова не наступит установившийся режим. Это будет, например, при э. д. с. $\dot{E}'_0$ и θ′.

Увеличение тока возбуждения вызовет изменение тока в якоре двигателя, а следовательно, и потока реакции якоря. За счет этого потока в обмотке якоря будет наводиться э. д. с. $\dot{E}'_я$. Эта

э. д. с. будет отставать от тока $\dot{I}'$ на угол 90°. При дальнейшем увеличении тока возбуждения вектор э. д. с. $\dot{E}_0$ займет, например, положение вектора $\dot{E}''_0$, вектор $\dot{E}_я$ — положение вектора $\dot{E}''_я$, а вектор тока $\dot{I}$ — положение вектора $\dot{I}''$.

Таким образом, из векторной диаграммы видно, что угол сдвига между током двигателя и напряжением сети изменяется при изменении тока возбуждения. Так, вектор тока $\dot{I}''$ упреждает вектор напряжения сети $\dot{U}_c$, вектор тока $\dot{I}'$ совпадает по фазе с вектором $\dot{U}_c$ и вектор тока $\dot{I}$ отстает от вектора $\dot{U}_c$. Иначе говоря, в зависимости от величины тока $I_в$ синхронный двигатель ведет себя либо как емкостная, либо как активная, либо как индуктивная нагрузка. Это свойство синхронных двигателей используется в электротехнике для улучшения коэффициента мощности сети. Синхронные двигатели, включаемые в сеть для улучшения $\cos\varphi$, называются синхронными компенсаторами.

На рис. 151 представлены зависимости тока статора от тока возбуждения, которые получили название U-образных характеристик. Чем больше мощность на валу, тем выше располагается U-образная кривая синхронного двигателя. На этом же графике нанесены кривые, характеризующие зависимость коэффициента мощности от тока возбуждения: $\cos\varphi = f(I_в)$. Ток возбуждения, при котором ток в якоре двигателя будет минимальным, называется нормальным током возбуждения $I_{в\,нр}$. При нормальном токе возбуждения коэффициент мощности двигателя равен единице.

## § 95. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рабочие характеристики представляют собой зависимости

$$n,\ M,\ \cos\varphi,\ \eta = f(P_2) \quad \text{при} \quad U_c = \text{const},\ I_в = \text{const и } f = \text{const}.$$

Рабочие характеристики синхронного двигателя изображены на рис. 152. Скорость вращения синхронного двигателя при изменении нагрузки на валу остается постоянной, поэтому скоростная характеристика $n = f(P_2)$ представляет собой прямую, параллельную оси абсцисс.

В установившемся режиме работы вращающий момент синхронного двигателя $M$ уравновешивается полезным моментом $M_2$ и моментом холостого хода $M_0$, т. е.

$$M = M_0 + M_2.$$

Полезный момент двигателя

$$M_2 = \frac{P_2}{n},$$

поэтому зависимость $M_2 = f(P_2)$ изображается прямой линией, выходящей из начала координат. Момент $M_0$ определяется потерями холостого хода, которые слагаются из потерь в стали и механических потерь двигателя. Эти потери не зависят от нагрузки на валу, поэтому моментная характеристика синхронного двигателя $M = f(P_2)$ будет представлять собой прямую линию, смещенную относительно характеристики $M_2 = f(P_2)$ на величину $M_0$.

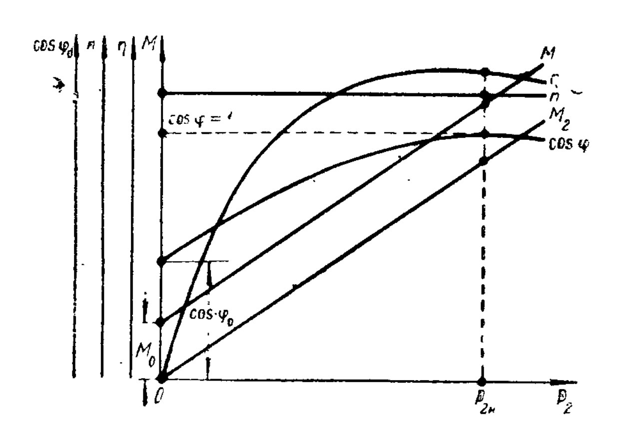



Рис. 152. Рабочие характеристики синхронного двигателя

Форма кривой $\cos\varphi = f(P_2)$ зависит от величины тока возбуждения. Обычно синхронные двигатели рассчитываются для работы при номинальной нагрузке, $\cos\varphi = 0{,}8$ и опережающем токе. Это позволяет использовать синхронную машину не только как двигатель, но и как компенсатор для улучшения коэффициента мощности всей системы.

Можно отрегулировать ток возбуждения так, что при номинальной нагрузке двигатель будет иметь $\cos\varphi = 1$ (рис. 152).

Характеристика $\eta = f(P_2)$ имеет такой же вид, как у электрических машин постоянного тока. У современных синхронных двигателей к. п. д. колеблется от 75 до 97%, причем более мощные двигатели имеют более высокий к. п. д.

# Раздел третий
# СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

*ГЛАВА XI*

## ЭЛЕКТРОМАШИННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ С ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

### § 96. ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА КАК УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ

Генератор постоянного тока независимого возбуждения можно использовать не только как источник электрической энергии для питания электрических потребителей, но и как усилитель мощности в схемах автоматического управления, так как мощность $P_в$, затрачиваемая на его возбуждение, во много раз меньше мощности $P$, отдаваемой им во внешнюю цепь.

Коэффициентом усиления генератора называют отношение

$$k_у = \frac{P}{P_в}.$$

Известно, что мощность возбуждения, как правило, составляет 3—5% от номинальной мощности генератора, поэтому коэффициент усиления у генераторов постоянного тока независимого возбуждения обычно не превышает 20—35.

Выясним, какое влияние на коэффициент усиления оказывают основные параметры генератора. Для этого рассмотрим величины, входящие в формулу коэффициента усиления

$$k_у = \frac{P}{P_в} = \frac{UI}{I_в^2 R_в} \approx \frac{EI}{I_в^2 R_в}.$$

Так как э. д. с., наводимая в обмотке якоря генератора,

$$E = \frac{p}{60}\frac{N}{a}n\Phi,$$

а число витков в параллельной ветви этой обмотки

$$w_я = \frac{1}{2}\frac{N}{2a},$$

то

$$k_у = \frac{4\frac{p}{60}nw_я\Phi I}{I_в^2 R_в}.$$

Умножив числитель и знаменатель правой части полученного уравнения на число витков обмотки возбуждения $w_в$, получим

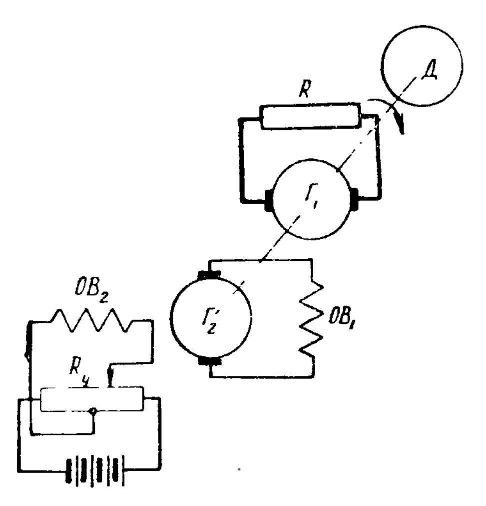



Рис. 153. Каскадное соединение двух генераторов постоянного тока, работающих в схеме усиления мощности

$$k_у = \frac{4\frac{p}{60}nw_я\Phi I}{I_в^2 R_в}\frac{w_в}{w_в}.$$

Если теперь принять во внимание, что коэффициент самоиндукции обмотки возбуждения генератора $L_в = w_в\frac{\Phi}{I_в}$, м. д. с. обмотки якоря $F_я = Iw_я$ и м. д. с. обмотки возбуждения $F_в = I_в w_в$, то можно написать:

$$k_у = 4\frac{p}{60}n\frac{L_в}{R_в}\frac{F_я}{F_в} = cn\frac{L_в}{R_в}\frac{F_я}{F_в}.$$

Отношение $\frac{L_в}{R_в}$ представляет собой постоянную времени обмотки возбуждения $T_в$, которая определяет продолжительность переходных процессов в цепях генератора. Поэтому окончательно выражение для коэффициента усиления имеет вид:

$$k_у = cnT_в\frac{F_я}{F_в}.$$

Таким образом, коэффициент усиления генератора прямо пропорционален скорости вращения, постоянной времени цепи возбуждения, м. д. с. якоря и обратно пропорционален м. д. с. возбуждения.

Генераторы постоянного тока независимого возбуждения вследствие большой индуктивности обмотки возбуждения имеют, как

правило, значительную постоянную времени $T_в$ и поэтому не обладают быстрой реакцией на изменение мощности возбуждения, т. е. не отличаются большим быстродействием.

Значительно более высокий коэффициент усиления можно получить, если осуществить каскадное включение двух генераторов постоянного тока (рис. 153). Здесь обмотка возбуждения основного генератора $Г_1$, работающего на нагрузку $R$, питается от генератора независимого возбуждения $Г_2$, который выполняет роль возбудителя. Так как в схеме имеют место две ступени усиления, то коэффициент усиления схемы равен произведению коэффициентов усиления ее ступеней:

$$k_у = k_{у1} k_{у2}.$$

При каскадном включении двух генераторов постоянного тока можно получить сравнительно высокие коэффициенты усиления. Однако схема получается громоздкой, сложной, малоэкономичной и недостаточно быстродействующей, так как сигнал проходит через две обмотки возбуждения, имеющие значительные постоянные времени. В связи с этим в настоящее время в различных автоматических системах управления широко применяют специальные электромашинные усилители с продольно-поперечным возбуждением (сокращенно ЭМУ).

## § 97. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭМУ

ЭМУ представляет собой двухполюсную электрическую машину постоянного тока (рис. 154), в которой для целей возбуждения используется как магнитный поток, создаваемый током обмотки возбуждения, так и поперечный магнитный поток, создаваемый током обмотки якоря. Обмотка возбуждения, которую в ЭМУ принято называть обмоткой управления, размещается на статоре вокруг полюсов машины. Питание ее осуществляется от постороннего источника электрической энергии. В отличие от обычных машин постоянного тока ЭМУ имеет две пары щеток, расположенных по продольной $dd$ и поперечной $qq$ осям машины. Поперечные щетки замкнуты накоротко; к продольным щеткам приключена нагрузка $R$.

При прохождении тока $I_у$ по обмотке управления $ОУ$ в ЭМУ создается магнитный поток управления $Ф_у$, который направлен по продольной оси электрической машины. За счет этого потока в обмотке вращающегося якоря наводится э. д. с. $E_q = c_E n Ф_у$; направление этой э. д. с. на рис. 154,*а* показано крестиками и точками в кружках, изображающих провода. Э. д. с. $E_q$ вызывает в короткозамкнутой цепи ток $I_q$. Величина этого тока определяется величиной э. д. с. $E_q$ и сопротивлением поперечной короткозамкнутой цепи усилителя $R_q$, которое слагается из сопротивления обмотки якоря и переходного сопротивления между поперечными щетками и коллектором.

Сопротивление $R_q$ обычно невелико, поэтому в поперечной цепи якоря ЭМУ даже при очень малых значениях э. д. с. $E_q$ будет протекать значительный ток $I_q$, который будет создавать значительный магнитный поток $\Phi_q$ по поперечной оси машины, неподвижный в пространстве. Иногда с целью увеличения коэффициента усиления ЭМУ в цепь поперечных щеток $qq$ включают дополнительно подмагничивающую обмотку *ОП*, которая создает поток $\Phi_n$ и этим усиливает поперечный поток ЭМУ (рис. 154,*б*).

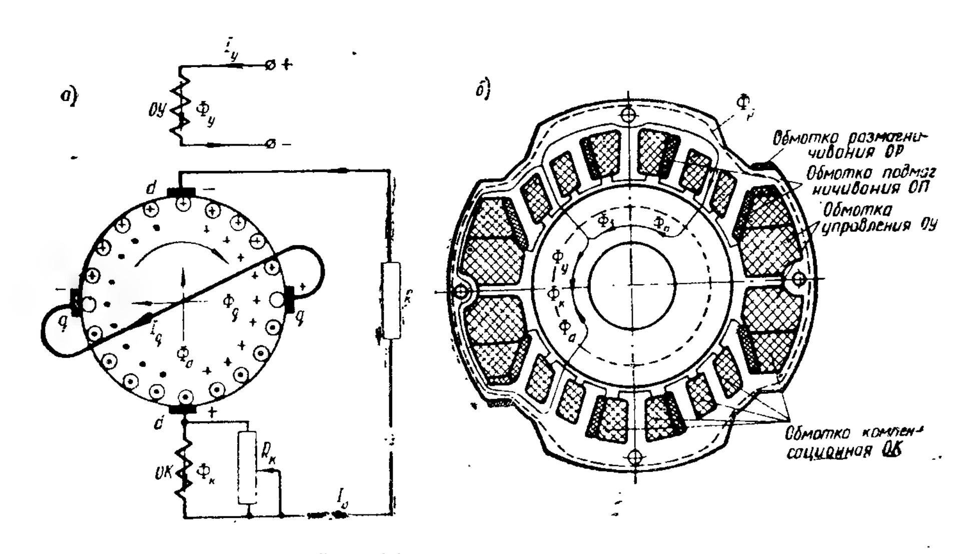



Рис. 154. Устройство ЭМУ:
а) принципиальная электрическая схема ЭМУ; б) расположение обмоток на статоре ЭМУ

При вращении якоря его обмотка будет пересекать магнитный поток $\Phi_q$, в результате чего в ней будет наводиться э. д. с. $E_d$, и между рабочими щетками $dd$, расположенными по продольной оси машины, появится напряжение. Направление этой э. д. с. на рис. 154,*а* указано крестиками и точками около проводов.

Если к рабочим щеткам присоединить нагрузку $R$, то в цепи появится ток $I_d$, который в обмотке якоря будет совпадать по направлению с э. д. с. $E_d$. Этот ток создаст магнитный поток реакции якоря $\Phi_d$, который будет направлен по продольной оси ЭМУ навстречу магнитному потоку управления $\Phi_y$. Так как магнитный поток управления мал, то даже при небольшой нагрузке он может быть уничтожен магнитным потоком реакции якоря. Чтобы предотвратить это, в ЭМУ выполняется компенсационная обмотка *ОК*, которая размещается в пазах полюсов (рис. 154,*б*) и включается последовательно в цепь продольных щеток так,

чтобы магнитный поток $\Phi_к$, создаваемый ею, был бы направлен навстречу потоку $\Phi_d$. Для изменения степени компенсации магнитного поля реакции якоря параллельно компенсационной обмотке включается сопротивление $R_к$.

Обычно ЭМУ работают с незначительной недокомпенсацией, поскольку при перекомпенсации возможно самовозбуждение ЭМУ, т. е. самопроизвольное увеличение напряжения на его зажимах даже при отсутствии тока в обмотке управления. Такой ЭМУ становится неуправляемым и, следовательно, непригодным для использования в схемах автоматического управления.

Таким образом, в ЭМУ с продольно-поперечным возбуждением имеются два каскада усиления. Первый каскад: обмотка управления — поперечная цепь якоря; второй каскад: поперечная цепь якоря — продольная цепь якоря. Если коэффициенты усиления первого и второго каскадов соответственно равны $k_{y1}$ и $k_{y2}$, то общий коэффициент усиления ЭМУ равен:

$$k_y = k_{y1}k_{y2}.$$

ЭМУ обычно выполняется в одном корпусе с приводным двигателем, которым чаще всего является двигатель постоянного тока параллельного или смешанного возбуждения.

Статор ЭМУ набирается из листов легированной электротехнической стали. Это делается не столько для повышения коэффициента полезного действия ЭМУ, сколько для увеличения его быстродействия, так как при переходных режимах вихревые токи оказывают демпфирующее действие на магнитные потоки ЭМУ. Ввиду того, что по статору между полюсами замыкается практически только поток управления, эта часть статора выполняется значительно меньшего сечения, чем спинка статора над полюсами, где проходит не только поток управления, но и поперечный поток возбуждения ЭМУ (рис. 154, *б*). Чтобы обеспечить примерно одинаковую магнитную проводимость по продольной и поперечной осям, полюсы у ЭМУ выполняются значительно более широкими, чем у обычных электрических машин постоянного тока. В полюсах выполняются пазы, в которых укладываются компенсационная *ОК* и подмагничивающая *ОП* обмотки ЭМУ. Обмотки управления *ОУ* (которых обычно две) располагаются вокруг полюсов. Кроме того, на изгибе статора иногда размещается состоящая из двух катушек специальная обмотка *ОР*, предназначенная для размагничивания ЭМУ.

## § 98. РАЗМАГНИЧИВАНИЕ ЭМУ

При отсутствии тока в цепи управления, т. е. при отсутствии сигнала, на зажимах ЭМУ всегда имеет место небольшое остаточное напряжение $E_{ост}$, обусловленное остаточной магнитной индукцией, которое может явиться причиной неправильной работы ис-

полнительного устройства. Например, при работе ЭМУ в качестве генератора системы Г-Д исполнительный двигатель может вращаться даже при отсутствии сигнала ($I_y = 0$), если остаточное напряжение на зажимах ЭМУ достаточно велико. Кроме того, в связи с неоднозначностью кривой намагничивания и, следовательно, неоднозначной зависимостью между током управления $I_y$ и выходным напряжением $E_{d0}$ ЭМУ (рис. 155, а), существенным об-

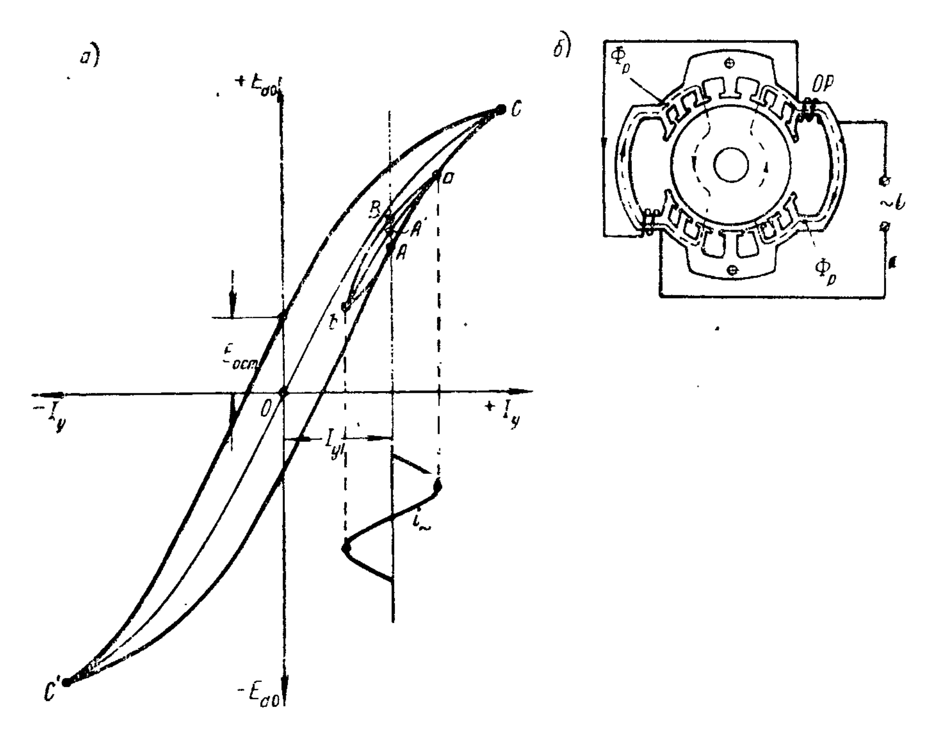



Рис. 155. Размагничивание ЭМУ

разом осложняется и процесс регулирования скорости вращения исполнительного двигателя, поскольку одному и тому же значению сигнала будет соответствовать различная скорость вращения исполнительного двигателя.

Чтобы обеспечить высокую точность работы автоматических систем управления, в некоторых ЭМУ принимаются специальные меры для снижения остаточного напряжения и сужения гистерезисной петли. На статоре ЭМУ размещаются две одинаковые катушки (рис. 155, *б*), которые питаются переменным током, получаемым через кольца, из якоря приводного двигателя. Катушки между собой соединяются последовательно так, чтобы магнитные потоки $Ф_р$, создаваемые ими, складывались в статоре и вычитались в роторе. Это исключает возможность наведения в обмотке якоря переменной э. д. с.

При прохождении переменного тока около катушек будет создаваться переменное магнитное поле, которое будет перемагничивать статор ЭМУ. Если, например, до перемагничивания э. д. с. ЭМУ определялась ординатой точки $A$, то при наложении на магнитную систему ЭМУ переменного магнитного поля магнитное состояние его при том же токе управлении $I_{у1}$ будет периодически изменяться. По мере увеличения тока $i_{\sim}$ в обмотке размагничивания магнитный поток ЭМУ и, следовательно, его э. д. с. сначала будут плавно возрастать по кривой $Aa$ до значения, определяемого ординатой точки $a$. Затем, когда ток $i_{\sim}$ начнет уменьшаться, магнитный поток и э. д. с. будут убывать по кривой $aB$. Далее при изменении тока $i_{\sim}$ в обратном направлении поток и э. д. с. будут сначала убывать по кривой $Bb$, а затем возрастать по кривой $bA$. Таким образом, при изменении тока $i_{\sim}$ магнитное состояние ЭМУ будет изменяться по кривой $AaBbA$, при этом среднее значение э. д. с. ЭМУ за период изменения тока размагничивания будет определяться ординатой точки $A'$. Иначе говоря, при наложении переменного магнитного поля на магнитную систему ЭМУ его рабочая точка смещается в сторону начальной кривой намагничивания $C'OC$. В связи с этим более узкой становится гистерезисная петля и меньше остаточное напряжение на зажимах ЭМУ.

Практика показывает, что специальные ЭМУ благодаря применению размагничивающих обмоток имеют практически однозначную кривую намагничивания.

## § 99. КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ И ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ ЭМУ

Каждый каскад усиления ЭМУ эквивалентен обычному генератору постоянного тока независимого возбуждения, поэтому, рассуждая аналогично предыдущему (см. § 96), можем написать:

$$k_{у1} = cnT_у \frac{F_q}{F_у}, \quad k_{у2} = cnT_q \frac{F_d}{F_q}$$

и, следовательно,

$$k_у = k_{у1} k_{у2} = c^2 n^2 T_у T_q \frac{F_d}{F_у}.$$

Здесь $T_у$ — постоянная времени обмотки управления;
$T_q$ — постоянная времени поперечной цепи ЭМУ;
$F_d$ — м. д. с. реакции якоря по продольной оси;
$F_у$ — м. д. с. обмотки управления.

Так как м. д. с. реакции якоря

$$F_d = AS\tau = AS \frac{\pi D_я}{2p},$$

а м. д. с. обмотки управления расходуется в основном на проведение магнитного поля через воздушный зазор, т. е.

$$F_y \approx 2 \frac{B_\delta}{\mu_0} k_\delta \delta,$$

то

$$k_y = c_1 n^2 T_y T_q \frac{ASD_я}{B_\delta \delta}.$$

Из полученной формулы следует, что увеличить коэффициент усиления ЭМУ можно путем повышения его скорости вращения, увеличения линейной нагрузки и диаметра якоря и уменьшения воздушного зазора и магнитной индукции в зазоре ЭМУ. В связи с этим специальные ЭМУ имеют обычно высокую скорость вращения (6000—9000 *об/мин*), минимальный воздушный зазор и малую магнитную индукцию в воздушном зазоре. Поскольку магнитная индукция в воздушном зазоре ЭМУ мала, они обладают ненасыщенной магнитной системой. Это дает возможность обеспечить у них не только высокий коэффициент усиления, но и линейную зависимость между сигналом и выходным напряжением. Последнее свойство имеет важное значение при использовании ЭМУ в системах автоматического управления и регулирования.

Повышать коэффициент усиления ЭМУ путем увеличения числа активных проводников обмотки якоря или числа витков обмотки управления нецелесообразно, так как это приводит к росту постоянных времени цепи якоря $T_q$ и цепи управления $T_y$, в результате чего одновременно с ростом коэффициента усиления увеличивается инерционность ЭМУ, т. е. уменьшается его быстродействие.

*Таблица 8*

| Наименование | 2УДМ-30 | УДМ-150 | АДУ-600 | АДУ-1300 |
|---|---|---|---|---|
| Номинальная мощность, *вт* | 30 | 120 | 530 | 1300 |
| Номинальное напряжение, *в* | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Скорость вращения, *об мин* | 8070—8200 | 6800 | 8600—8900 | 6080—6580 |
| Ток управления, *ма* . . . . | 9,8—10,8 | 9,4—12 | 11—14,8 | 14,6—16,6 |
| Коэффициент усиления . . | 87—104 | 550—800 | 1500—2850 | 3000—3700 |
| Э. д. с. остаточного магнетизма (без размагничивания), *в* . . . . . . . . . | 6—7 | 8—10 | 8—10 | 8—10 |
| К. п. д. агрегата, % . . . . | 31—33,7 | 43,8 | 44,8—46,9 | 53—54,1 |
| Вес агрегата, *кг* . . . . . . | 3,54 | 5,36 | 13,0 | 26,0 |

Коэффициент усиления большинства серийных специальных ЭМУ находится в пределах от 1000 до 4000, причем с увеличением мощности коэффициент усиления возрастает. У маломощных ЭМУ (30—120 *вт*) коэффициент усиления не превышает 1000.

В заключение следует отметить, что обычно ЭМУ выполняются со значительно меньшими коэффициентами усиления, чем это возможно, но зато с очень небольшими постоянными времени, поскольку в схемах автоматического управления, где они используются, требуется малая инерционность.

В таблице 8 приведены данные некоторых серийных ЭМУ.

## § 100. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМУ

### 1. Характеристика холостого хода:

$$E_{d0}=f(I_y) \quad \text{при} \quad I_d=0 \quad \text{и} \quad n=\text{const}.$$

Характеристика холостого хода ЭМУ, снятая при изменении тока управления в пределах от $+I_{y\,макс}$ до $-I_{y\,макс}$, представляет собой петлю (рис. 156,*а*). Э. д. с. остаточного магнетизма у ЭМУ достигает 10 — 15% от номинального напряжения вместо 3% у обычных генераторов постоянного тока. Объясняется это тем, что э.д.с. остаточного магнетизма ЭМУ усиливается во втором каскаде.

При наложении переменного магнитного поля на магнитную систему ЭМУ характеристика холостого хода превращается практически в однозначную кривую, проходящую через начало координат. Эта кривая, вследствие слабого насыщения магнитной цепи ЭМУ, имеет значительный прямолинейный участок, на котором обычно и находится рабочая точка ЭМУ. Чем больше крутизна у характеристики холостого хода, тем ЭМУ чувствительней к сигналам. Характеристика холостого хода ЭМУ представляет собой почти прямую линию, поэтому крутизна ее $\xi=\frac{E_{d0}}{I_y}\approx\text{const}$. Это означает, что ЭМУ обладает практически одинаковой чувствительностью во всем диапазоне изменения тока управления.

### 2. Скоростная характеристика:

$$E_d=f(n) \quad \text{при} \quad I_y=\text{const} \quad \text{и} \quad I_d=0.$$

Э. д. с., снимаемая с рабочих щеток ЭМУ, равна:

$$E_d=cn\Phi_q.$$

Так как магнитная система ЭМУ ненасыщена, то магнитный поток $\Phi_q$ пропорционален току $I_q$, который, в свою очередь, равен

$$I_q=\frac{E_q}{R_q},$$

где $R_q$ — сопротивление цепи якоря по поперечной оси.

Если принять во внимание, что при полной компенсации поля реакции якоря $E_q = cn\Phi_y$, а поток управления $\Phi_y = I_y$, то э. д. с.

$$E_d = c'nI_q = c'n\frac{E_q}{R_q} = c'n\frac{cn\Phi_y}{R_q} = c'_1 n^2 \Phi_y$$

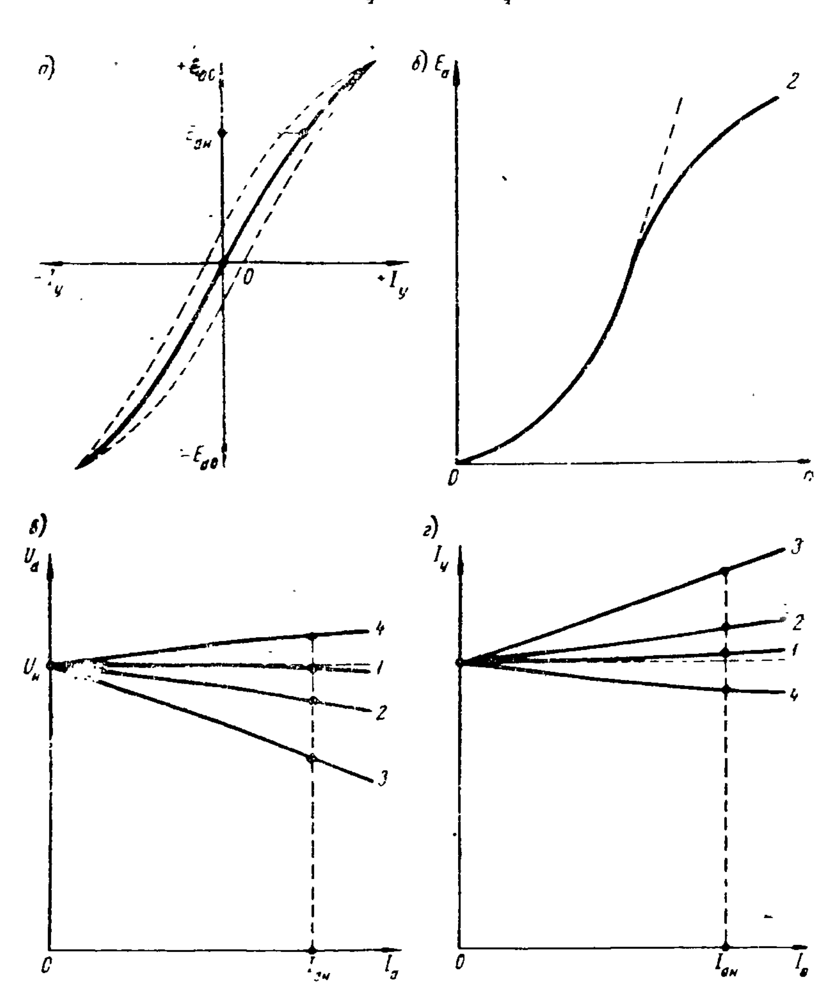


Рис. 156. Характеристики ЭМУ:
а) характеристика холостого хода; б) скоростная характеристика; в) внешние характеристики; г) регулировочные характеристики

или окончательно

$$E_d = c_2 n^2 I_y.$$

Таким образом, при данном токе управления э. д. с. ЭМУ пропорциональна квадрату скорости вращения, т. е. зависимость

$E_d = f(n)$ представляет собой параболу (кривая *1*, рис. 156,*б*). Однако это справедливо только в том случае, если щетки $qq$ находятся на геометрической нейтрали ЭМУ и не учитывается размагничивающее действие коммутационной реакции якоря на поле управления.

В действительности при замедленной коммутации в секциях, замкнутых накоротко поперечными щетками $qq$, токи будут иметь такое же направление, как до начала коммутации (рис. 157). В связи с этим магнитный поток $\Phi_{тк}$, создаваемый коммутирующими секциями, будет направлен навстречу потоку управления $\Phi_y$ и будет ослаблять его. Чем выше скорость вращения, тем больше величина реактивной э. д. с., больше токи в коммутирующих секциях и, следовательно, больше поток $\Phi_{тк}$. Поэтому в реальных условиях при увеличении скорости вращения э. д. с. ЭМУ будет возрастать не по кривой *1*, а по кривой *2* (рис. 156,*б*).

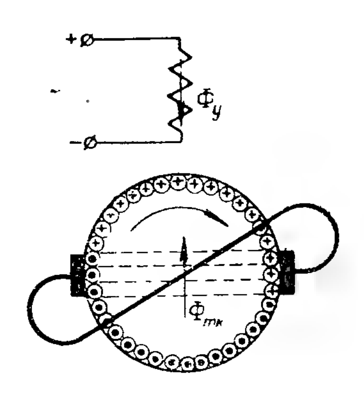


Рис. 157. Реакция коммутационных токов

В генераторах постоянного тока ослабление поля возбуждения за счет размагничивающего действия поля коммутационных токов обычно не рассматривается, так как поток $\Phi_{тк}$ ничтожно мал по сравнению с основным потоком возбуждения машины. По этим же соображениям нет необходимости учитывать размагничивающее действие поля коммутационных токов продольных щеток $dd$, так как это поле ничтожно мало по сравнению с поперечным полем возбуждения ЭМУ.

### 3. Внешние характеристики:

$$U_d = f(I_d) \quad \text{при} \quad I_y = \text{const и } n = \text{const}.$$

При нагрузке напряжение на рабочих зажимах ЭМУ равно:

$$U_d = E_d - I_d R_d,$$

где $R_d$ — сопротивление цепи якоря по продольной оси.

Э. д. с. $E_d$ при постоянной скорости вращения пропорциональна результирующему магнитному потоку ЭМУ по продольной оси, т. е. $E_d = c_3 \Phi$. Поскольку ЭМУ имеет ненасыщенную магнитную систему, можно считать, что результирующий магнитный поток равен алгебраической сумме всех потоков, действующих по продольной оси:

$$\Phi = \Phi_y - (\Phi_d + \Phi_{тк} - \Phi_к).$$

Следовательно, напряжение

$$U_d = c_3\Phi - I_d R_d = c_3 [\Phi_y - (\Phi_d + \Phi_{тк} - \Phi_к)] - I_d R_d.$$

Таким образом, при постоянном токе управления ($I_y = \text{const}$) напряжение на зажимах ЭМУ зависит не только от величины нагрузки, но и от степени компенсации поля продольной реакции якоря.

При полной компенсации результирующий магнитный поток ЭМУ равен потоку управления, поэтому

$$U_d = c_3\Phi_y - I_d R_d$$

и, следовательно, внешняя характеристика ЭМУ имеет вид почти горизонтальной прямой (прямая *1*, рис. 156,*в*).

Небольшое уменьшение напряжения на зажимах ЭМУ при росте нагрузки объясняется омическим падением напряжения в продольной цепи якоря.

При недокомпенсации в ЭМУ, кроме омического падения напряжения, сказывается размагничивающее действие поля продольной реакции якоря, поэтому зависимость $U_d = f(I_d)$ представляет собой падающую характеристику (прямая *2*). В случае значительной недокомпенсации размагничивающее действие поля реакции якоря усиливается, в связи с чем внешняя характеристика ЭМУ круче идет вниз (прямая *3*).

При перекомпенсации поле, создаваемое компенсационной обмоткой, будет больше поля реакции якоря, поэтому рост тока нагрузки будет сопровождаться повышением напряжения на зажимах ЭМУ (прямая *4*).

### 4. Регулировочные характеристики:

$$I_y = f(I_d) \text{ при } U_{dн} = \text{const и } n = \text{const}.$$

Примерный вид регулировочных характеристик ЭМУ при различной степени компенсации поля продольной реакции якоря изображен на рис. 156,*г*. Как видно из графика, регулировочная характеристика компенсированного ЭМУ представляет собой почти горизонтальную прямую линию *1*. Регулировочная характеристика недокомпенсированного ЭМУ изображается практически прямой линией, которая по мере увеличения тока нагрузки поднимается вверх (прямая *2*), причем, чем сильнее недокомпенсирован ЭМУ, тем круче вверх идет регулировочная характеристика (например, прямая *3*). В случае перекомпенсации зависимость $I_y = f(I_d)$ представляет собой падающую характеристику (прямая *4*).

ГЛАВА XII

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МИКРОМАШИНЫ АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

## § 101. ДВИГАТЕЛИ С ПОЛЫМ РОТОРОМ

Двигатель с полым ротором (сокращенно ДПР) является двухфазным асинхронным двигателем, у которого ротор выполнен из алюминия или бронзы в виде полого цилиндра (рис. 158, *а*). Такой ротор можно рассматривать как беличью клетку, состоящую из очень большого числа стержней, расположенных вплотную друг к другу. Для уменьшения сопротивления магнитной цепи двигателя внутри ротора размещается стальной шихтованный сердечник.

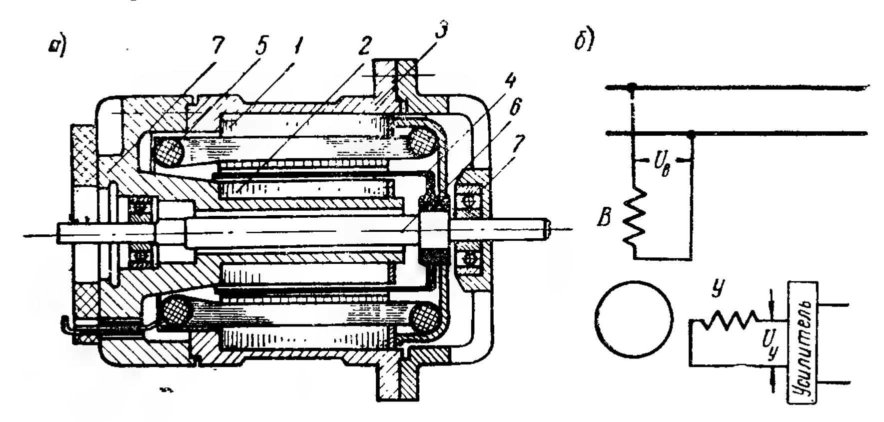



**Рис. 158. Устройство и схема включения в сеть ДПР:**
*1*—статор; *2*—сердечник; *3*—корпус; *4*—полый ротор; *5*—обмотка; *6*—вал; *7*—подшипниковый щит

Статор двигателя набирается из листовой легированной электротехнической стали. В пазах его укладываются две обмотки, оси которых сдвинуты друг относительно друга на угол 90°. Одна из обмоток называется обмоткой возбуждения *В*, другая — обмоткой управления *У*. Обмотка возбуждения питается от сети переменного тока с постоянной амплитудой напряжения, а обмотка управления питается от усилителя переменного напряжения той же частоты (рис. 158, *б*). Сдвиг во времени между токами этих обмоток, необходимый для создания вращающегося магнитного поля (см. § 80), обеспечивается либо схемой управления, в которой работает ДПР, либо конденсатором, который обычно включается в цепь обмотки возбуждения.

Отношение напряжения управления к напряжению возбуждения $\frac{U_у}{U_в} = \alpha$ называется коэффициентом сигнала. Если

$\alpha=1$, вращающееся магнитное поле в двигателе будет круговым. Если $\alpha \neq 1$, вращающееся магнитное поле будет эллиптическим (см. § 80).

Предположим, что к обмотке возбуждения подведено напряжение $u_в = U_{в\,макс} \sin \omega t$, а к обмотке управления — напряжение $u_у = U_{у\,макс} \cos \omega t$, причем $U_у \neq U_в$. Если считать магнитную систему двигателя ненасыщенной, то переменные напряжения $U_в$ и $U_у$ будут создавать пропорциональные им пульсирующие магнитные потоки $\Phi'_в = \Phi_{в\,макс} \sin \omega t$ и $\Phi'_у = \Phi_{у\,макс} \cos \omega t$. Полагая, что в пространстве каждый из этих потоков распределен по закону косинуса относительно оси своей катушки, имеем:

$$\Phi_в = \Phi'_в \cos \psi = \Phi_{в\,макс} \sin \omega t \cos \psi\,,$$

и

$$\Phi_у = \Phi'_у \cos\left(\psi + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_{у\,макс} \cos \omega t \cos\left(\psi + \frac{\pi}{2}\right) =$$

$$= -\Phi_{у\,макс} \cos \omega t \sin \psi,$$

где $\psi$ — угловая координата, определяющая положение точки, для которой рассматривается амплитудное значение магнитного потока.

Если каждый из пульсирующих магнитных потоков представить в виде двух потоков, имеющих половинные амплитуды и вращающихся в противоположные стороны с одинаковой скоростью:

$$\Phi_в = \Phi_{в\,макс} \sin \omega t \cos \psi = \frac{\Phi_{в\,макс}}{2} \sin(\omega t - \psi) + \frac{\Phi_{в\,макс}}{2} \sin(\omega t + \psi),$$

$$\Phi_у = -\Phi_{у\,макс} \cos \omega t \sin \psi = \frac{\Phi_{у\,макс}}{2} \sin(\omega t - \psi) - \frac{\Phi_{у\,макс}}{2} \sin(\omega t + \psi),$$

а затем сложить отдельно потоки, вращающиеся в одном и другом направлении, то получим:

$$\Phi_{пр} = \frac{\Phi_{в\,макс} + \Phi_{у\,макс}}{2} \sin(\omega t - \psi),$$

$$\Phi_{об} = \frac{\Phi_{в\,макс} - \Phi_{у\,макс}}{2} \sin(\omega t + \psi).$$

Следовательно, эллиптическое магнитное поле, которое имеет место в ДАР при $\alpha \neq 1$, можно заменить двумя круговыми полями, вращающимися с синхронной скоростью $n_1$ в противоположных направлениях. Большее из них $\Phi_{пр}$, совпадающее по направлению с вращающимся эллиптическим полем, называется прямым, меньшее $\Phi_{об}$, вращающееся в противоположную сто-

рону, — обратным (рис. 159). Если $U_y = U_в$ и, следовательно, $\Phi_{y\,макс} = \Phi_{в\,макс}$, то $\Phi_{об} = 0$. Иначе говоря, при $\alpha = 1$ в двигателе будет только прямое магнитное поле.

Так как вращающие моменты, создаваемые прямым $\Phi_{пр}$ и обратным $\Phi_{об}$ магнитными потоками, направлены в разные стороны, результирующий момент ДПР будет равен

$$M = M_{пр} - M_{об}.$$

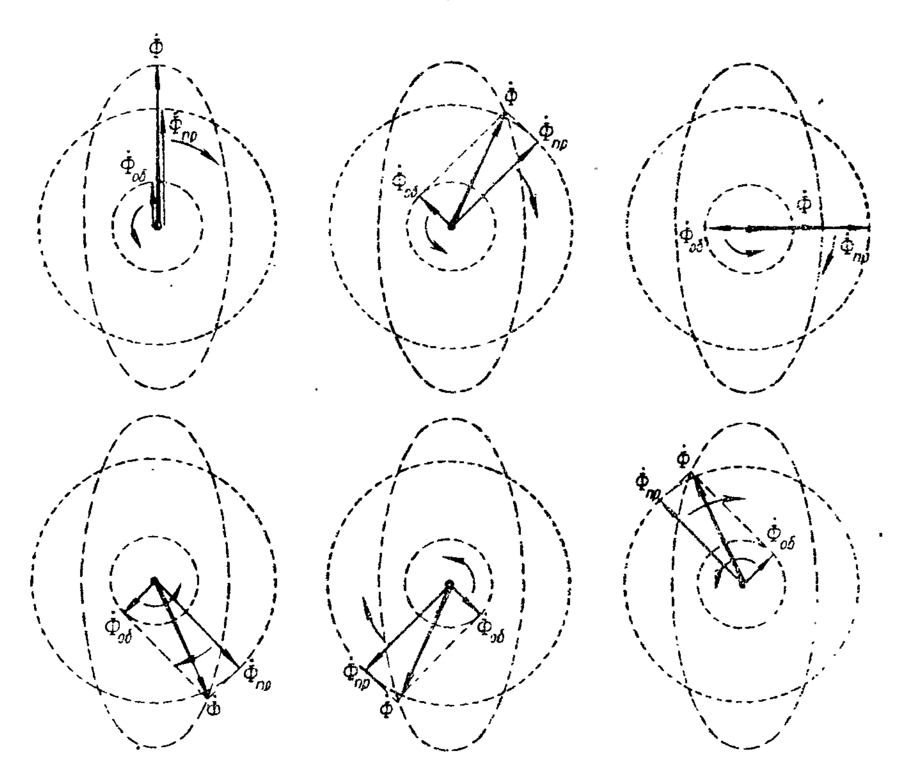



Рис. 159. Разложение эллиптического магнитного поля на два вращающихся в разные стороны круговых поля

Из теории трехфазных асинхронных двигателей известно (см. § 75), что вращающий момент, обусловленный вращающимся магнитным потоком,

$$M = c_1 U_1^2 \frac{sr_2}{r_2^2 + x_2^2 s^2} = c' \Phi^2 \frac{sr_2}{r_2^2 + x_2^2 s^2}.$$

Следовательно, вращающий момент ДПР

$$M = M_{пр} - M_{об} = c' \Phi_{пр}^2 \frac{s_{пр} r_2}{r_2^2 + x_2^2 s_{пр}^2} - c' \Phi_{об}^2 \frac{s_{об} r_2}{r_2^2 + x_2^2 s_{об}^2}.$$

Так как активное сопротивление ротора во много раз превышает его индуктивное сопротивление ($r_2 \gg x_2$),

$$M = c'\Phi^2_{пр}\frac{s_{пр}}{r_2} - c'\Phi^2_{об}\frac{s_{об}}{r_2} = c''\Phi^2_{пр}s_{пр} - c''\Phi^2_{об}s_{об}.$$

Если скорость вращения магнитного поля $n_1$ и скорость вращения ротора $n_2$, то скольжение ротора относительно прямого поля

$$s_{пр} = s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

а скольжение ротора относительно обратного поля

$$s_{об} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = \frac{n_1 + n_2 + (n_1 - n_1)}{n_1} = 2 - s.$$

Подставляя в формулу вращающего момента амплитудные значения потоков $\Phi_{пр}$ и $\Phi_{об}$, а также скольжения $s_{пр}$ и $s_{об}$, получим:

$$M = c''\left[\left(\frac{\Phi_{в\,макс} + \Phi_{у\,макс}}{2}\right)^2 s - \left(\frac{\Phi_{в\,макс} - \Phi_{у\,макс}}{2}\right)^2 (2 - s)\right] =$$

$$= c''\left[\Phi_{в\,макс}\Phi_{у\,макс} - (1 - s)\frac{\Phi^2_{в\,макс} + \Phi^2_{у\,макс}}{2}\right]$$

или

$$M = c''\Phi^2_{в\,макс}\alpha\left[1 - (1 - s)\frac{1 + \alpha^2}{2\alpha}\right],$$

где $\alpha = \frac{U_у}{U_в} = \frac{\Phi_{у\,макс}}{\Phi_{в\,макс}}$.

В момент пуска скольжение $s = 1$ и, следовательно, пусковой момент

$$M_п = c''\Phi_{в\,макс}\Phi_{у\,макс} = c''\Phi^2_{в\,макс}\alpha.$$

Из полученного выражения видно, что для осуществления реверса двигателя достаточно изменить фазу напряжения на обмотке управления на 180°.

При идеальном холостом ходе, когда нагрузка на валу двигателя отсутствует и потерями в двигателе можно пренебречь, вращающий момент двигателя $M = 0$. Обозначая скорость вращения ротора и скольжение при идеальном холостом ходе соответственно $n_{20}$ и $s_0$, имеем:

$$\left[1 - (1 - s_0)\frac{1 + \alpha^2}{2\alpha}\right] = 0,$$

$$1 - s_0 = \frac{n_{20}}{n_1} = \frac{2\alpha}{1 + \alpha^2}$$

и, следовательно,

$$n_{20} = n_1 \frac{2\alpha}{1+\alpha^2}.$$

Таким образом, скорость вращения идеального холостого хода ДПР $n_{20}$ при $\alpha \neq 1$ всегда меньше скорости вращения магнитного поля $n_1$, так как обратное магнитное поле оказывает тормозящее действие на ротор. При $\alpha = 1$ вращающееся магнитное поле в ДПР будет круговым и $n_{20} = n_1$.

Одной из основных характеристик, определяющих рабочие свойства двигателя, является, как известно, механическая характеристика, представляющая собой зависимость $n_2 =$

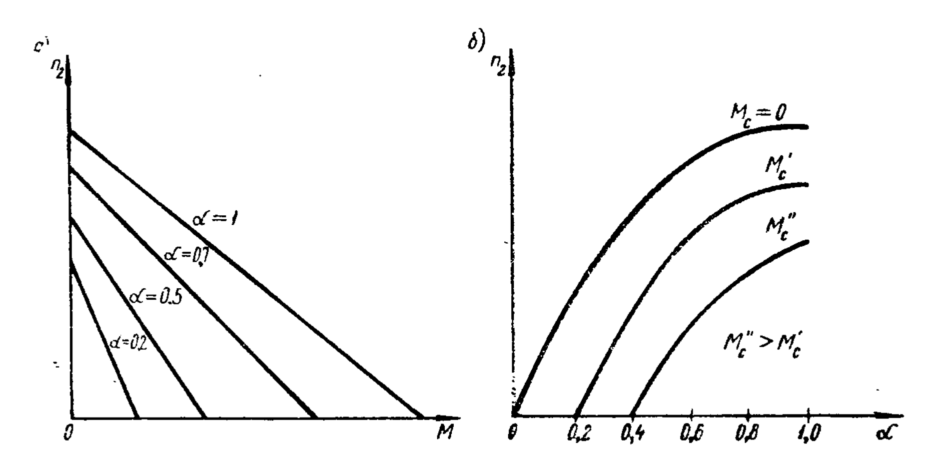



Рис. 160. Характеристики ДПР:
а) механические характеристики; б) регулировочные характеристики

$= f(M)$. Для получения уравнения этой характеристики преобразуем выражение вращающего момента следующим образом:

$$M = c''\Phi^2_{в\,макс}\alpha \left[1 - (1-s)\frac{1+\alpha^2}{2\alpha}\right] = M_n\left[1 - \frac{n_2}{n_1}\frac{1+\alpha^2}{2\alpha}\right],$$

откуда

$$n_2 = n_1 \frac{2\alpha}{1+\alpha^2}\left(1 - \frac{M}{M_n}\right).$$

Следовательно, механическая характеристика представляет собой прямую, проходящую под некоторым углом к оси абсцисс (рис. 160,*а*). Наклон характеристики зависит от коэффициента сигнала $\alpha$. Чем $\alpha$ меньше, тем более падающей будет характеристика.

Изменяя величину напряжения управления $U_у$, т. е. изменяя $\alpha$, можно плавно и в широких пределах изменять скорость

вращения ДПР. Зависимость скорости вращения ротора от коэффициента сигнала $n_2 = f(\alpha)$ называют регулировочной характеристикой ДПР. Примерный вид регулировочных характеристик при различных моментах сопротивления $M_c$ на валу представлен на рис. 160,*б*. Из графика видно, что при небольших значениях $\alpha$ скорость вращения ротора изменяется примерно пропорционально $\alpha$. При $\alpha = 1$ скорость вращения достигает максимальной величины. Значение напряжения $U_y$, соответствующее определенному $\alpha$, при котором ротор двигателя, имея на валу определенную нагрузку, начинает вращаться, называется напряжением трогания.

Двухфазные асинхронные двигатели имеют склонность к самоходу, т. е. при снятии управляющего сигнала ротор двигателя может продолжать вращение, если вращающий момент, обусловленный прямым полем, будет достаточен для преодоления момента сопротивления на валу двигателя. Самоход означает потерю управления двигателем, что совершенно недопустимо для исполнительных двигателей, работающих в автоматических системах. Самоход у ДПР устраняется путем повышения активного сопротивления ротора. Для этого ротор двигателя выполняется в виде полого тонкостенного цилиндра. Толщина стенок ротора у большинства ДПР составляет 0,15—0,5 *мм*.

ДПР обычно изготовляются мощностью не более 10—15 *вт*. Благодаря малой инерционности, простому способу регулирования скорости вращения и удобству реверсирования, они получили широкое применение в маломощных системах автоматического управления.

## § 102. ГИСТЕРЕЗИСНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Статор гистерезисного двигателя выполняется аналогично статору обычного асинхронного двигателя. На статоре укладывается трехфазная или двухфазная обмотка. Если обмотка двухфазная, то для получения вращающегося магнитного поля одна из фаз двигателя в сеть однофазного тока включается через конденсатор. Ротор гистерезисного двигателя представляет собой полый цилиндр из магнитотвердого материала, который напрессовывается на латунную или стальную втулку (рис. 161). С целью уменьшения потерь на вихревые токи ротор обычно набирается из отдельных изолированных друг от друга плоских колец. Для изготовления ротора используются те же магнитотвердые материалы, что и для изготовления постоянных магнитов. Наиболее высокие энергетические показатели имеют гистерезисные двигатели с ротором из викаллоя, который представляет собой сплав кобальта (52—54%) и ванадия (5—13%) с железом. Магнитотвердый материал, из которого выполнен ротор, находится в размагниченном состоянии. Намагничивание его осуществляется магнитным полем статора во время пуска в ход гистерезисного двигателя.

Выясним природу гистерезисного момента. Известно, что любое ферромагнитное тело можно рассматривать состоящим из хаотически расположенных элементарных магнитиков, которые обла-

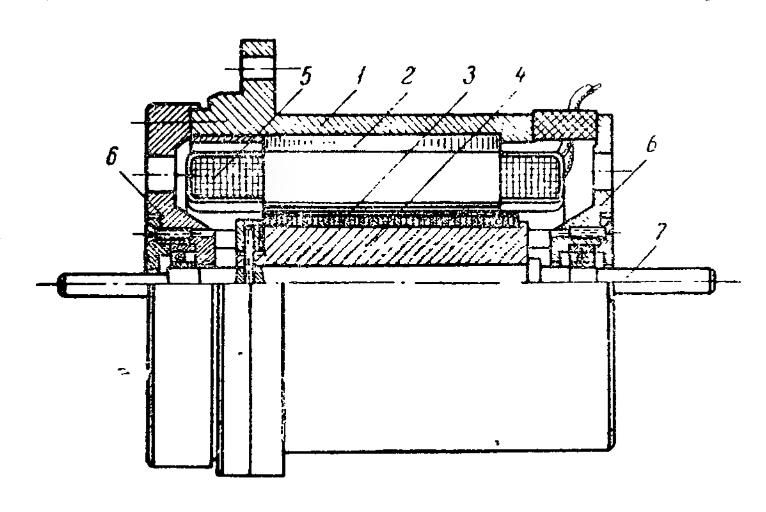



Рис. 161. Устройство гистерезисного двигателя:
1—корпус; 2—статор; 3—активная часть ротора; 4—втулка; 5—обмотка статора; 6—подшипниковый щит; 7—вал

дают способностью поворачиваться вокруг своих осей. Если цилиндрическое тело поместить в магнитное поле, то элементарные магнитики ориентируются вдоль линий магнитного поля, и на по-

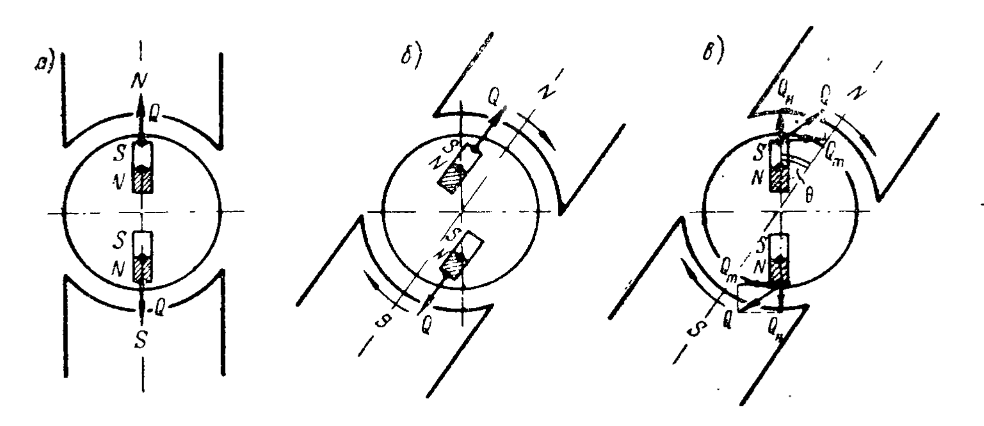



Рис. 162. Принцип работы гистерезисного двигателя

верхности цилиндра появляются полюса противоположной полю полярности, т. е. цилиндр намагничивается. На рис. 162, *а* магнитное поле, создаваемое обмоткой статора гистерезисного двигателя,

условно представлено магнитным полем двух постоянных магнитов $N$ и $S$.

Если магнитное поле вращается со скоростью $n_1$ и силы молекулярного трения, тормозящие поворот элементарных магнитиков, отсутствуют, т. е. материал ротора не обладает гистерезисом, то элементарные магнитики будут вращаться синхронно с магнитным полем (рис. 162, *б*). Силы взаимодействия между элементарными магнитиками и полем будут иметь, как и при неподвижном роторе, только нормальные составляющие, уравновешивающие друг друга, поэтому ротор останется неподвижным. В действительности, вследствие внутреннего молекулярного трения, которое особенно велико у магнитотвердых материалов, элементарные магнитики не будут успевать поворачиваться вслед за полем, поэтому появится некоторый угол рассогласования $\theta$ между осью поля и осью наведенных полюсов ротора (рис. 162, *в*). Результирующая сила взаимодействия $Q$ между наведенными полюсами ротора и внешним магнитным полем будет иметь нормальную $Q_н$ и касательную $Q_m$ составляющие. Пара касательных составляющих будет создавать вращающий момент, который будет увлекать ротор вслед за вращающимся магнитным полем. Поскольку этот момент обусловливается гистерезисом материала ротора, он называется гистерезисным моментом.

Во время разгона ротор перемагничивается, причем частота перемагничивания по мере нарастания скорости вращения постепенно уменьшается и при достижении синхронной скорости вращения прекращается. В синхронном режиме вращающий момент у гистерезисного двигателя создается, так же как у обычного синхронного двигателя, в результате взаимодействия магнитного поля статора с намагниченным ротором.

В процессе работы гистерезисного двигателя угол рассогласования $\theta$ не остается постоянным. При увеличении тормозного момента на валу угол рассогласования возрастает и, следовательно, возрастает величина касательных составляющих результирующей силы взаимодействия, которые обусловливают вращающий момент двигателя. При уменьшении нагрузки угол рассогласования уменьшается и вращающий момент двигателя падает. Если тормозной момент на валу превысит некоторый максимальный вращающий момент $M_{макс}$, соответствующий максимальному углу рассогласования $\theta_{макс}$, то гистерезисный двигатель выпадает из синхронизма. Величина $\theta_{макс}$ не зависит от скорости вращения ротора, а определяется гистерезисными свойствами материала ротора. Обычно $\theta_{макс} = 30 \div 60°$.

Если не учитывать потери на вихревые токи, то механическая мощность, развиваемая таким идеальным гистерезисным двигателем при пуске в ход, равна разности электромагнитной мощности и мощности потерь на гистерезис:

$$P_{мех} = P_{эм} - P_г,$$

откуда

$$P_г = P_{эм} - P_{мех} = M\Omega_1 - M\Omega_2 = M(\Omega_1 - \Omega_2),$$

где $M$ — вращающий момент двигателя;
$\Omega_1$ — угловая скорость вращения магнитного поля;
$\Omega_2$ — угловая скорость вращения ротора.

Так как скольжение

$$s = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1},$$

то

$$P_г = M\Omega_1 s = P_{эм} s.$$

При неподвижном роторе, когда $\Omega_2 = 0$, $s = 1$ и $P_{мех} = 0$, вся электромагнитная мощность, передаваемая со статора на ротор, идет на перемагничивание ротора, следовательно,

$$P_{эм} = P_г = p_г G_p = c_г f_1 B^2_{макс} G_p,$$

где $p_г$ — удельные потери на гистерезис;
$G_p$ — вес стали, подвергающейся перемагничиванию;
$c_г$ — постоянная потерь на гистерезис, зависящая от марки стали;
$B_{макс}$ — максимальное значение магнитной индукции;
$f_1$ — частота перемагничивания.

При разгоне ротора частота перемагничивания материала ротора будет $f_2$, поэтому

$$P_г = c_г f_2 B^2_{макс} G_p.$$

Так как

$$f_2 = f_1 s,$$

то

$$P_г = c_г f_1 s B^2_{макс} G_p.$$

Подставляя значения $P_{эм}$ и $P_г$ в выражение для механической мощности, имеем:

$$P_{мех} = M\Omega_2 = P_{эм} - P_г = c_г f_1 B^2_{макс} G_p (1 - s),$$

откуда

$$M = \frac{P_{мех}}{\Omega_2} = \frac{c_г f_1 B^2_{макс} G_p (1 - s)}{\Omega_1 (1 - s)} = \frac{p_г G_p}{\Omega_1}.$$

Из полученного выражения видно, что вращающий момент гистерезисного двигателя не зависит от скорости вращения ротора, а определяется только удельными потерями на гистерезис и количеством перемагничиваемого материала. В связи с этим максимальный вращающий момент гистерезисного двигателя $M_{макс}$ в синхронном режиме равен пусковому моменту двигателя $M'_п$.

Механическая характеристика $n_2 = f(M)$ идеального гистерезисного двигателя представляет собой ломаную ли-

нию $A'BD$ (рис. 163). Участок $A'B$ этой характеристики соответствует разгону двигателя до синхронной скорости вращения, а участок $BD$ — работе двигателя в синхронном режиме.

В реальном гистерезисном двигателе при разгоне ротора, кроме гистерезисного момента, имеет место и некоторый асинхронный момент, обусловленный вихревыми токами в роторе, который изменяется от максимального значения, равного отрезку $A'A$, при $n_2 = 0$ до нуля при $n_2 = n_1$. Поэтому пусковой момент $M_п$ реального гистерезисного двигателя несколько превышает его максимальный синхронный момент $M_{макс} = DB$, а реальная механическая характеристика $n_2 = f(M)$ изображается кривой $ABD$.

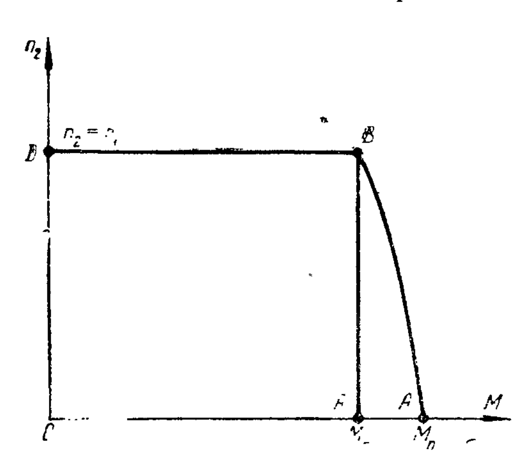


Рис. 163. Механическая характеристика гистерезисного двигателя

Гистерезисные двигатели по сравнению с обычными синхронными магнитоэлектрическими двигателями имеют низкий коэффициент мощности (обычно $\cos\varphi = 0{,}3 \div 0{,}5$), что объясняется сравнительно слабой намагниченностью ротора. Чтобы повысить $\cos\varphi$, иногда при пуске кратковременно повышают напряжение $U$ на зажимах двигателя (перевозбуждают двигатель), а затем после вхождения двигателя в синхронизм напряжение $U$ снижают до номинальной величины.

Гистерезисные двигатели благодаря простой конструкции и хорошим пусковым свойствам получили довольно широкое применение в маломощных системах автоматического управления, в установках для записи и воспроизведении звука, а также в прецизионных гироскопических устройствах самолетов и ракет.

## § 103. ТАХОГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

При постоянном магнитном потоке Ф между э. д. с. якоря $E$ и скоростью вращения генератора $n$ существует, как известно, линейная зависимость $E = c_E n\Phi = c'_E n$. Поэтому генератор постоянного тока можно использовать как **тахогенератор** для измерения скорости вращения.

Тахогенераторы постоянного тока выполняются с магнитным и электромагнитным возбуждением. В автоматических системах и счетно-решающих устройствах чаще применяются магнитоэлек-

трические тахогенераторы. Эти тахогенераторы не требуют для возбуждения источников электрической энергии и мало чувствительны к колебаниям температуры. Магнитотвердые материалы, применяемые в настоящее время для изготовления постоянных магнитов, отличаются высокими магнитными свойствами и поэтому в течение длительного времени обеспечивают у тахогенераторов достаточно стабильный магнитный поток.

Если считать $\Phi = \text{const}$ и падение напряжения в цепи якоря равно нулю, то **выходная характеристика тахогенератора**, представляющая собой зависимость напряжения от скорости вращения $U = f(n)$, будет иметь вид прямой, выходящей из начала координат. Однако в реальных условиях, вследствие размагничивающего действия поперечной реакции якоря и нелинейной зависимости падения напряжения в щеточном контакте от тока якоря, характеристика $U = f(n)$ может несколько отличаться от прямой линии. Это отличие будет тем больше, чем меньше сопротивление измерительного устройства, на которое работает тахогенератор и, следовательно, больше ток нагрузки. Чтобы уменьшить это влияние, измерительное устройство выбирают по возможности с наибольшим сопротивлением. Кроме того, в тахогенераторах применяют металлические щетки и магнитную систему их выполняют ненасыщенной.

## § 104. АСИНХРОННЫЙ ТАХОГЕНЕРАТОР

**Асинхронный тахогенератор** по своему устройству аналогичен рассмотренному ранее (см. § 101) двухфазному асин-

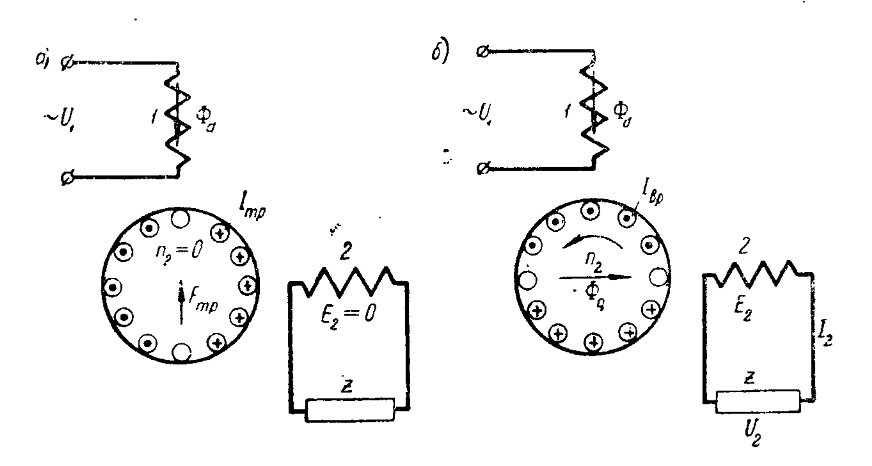



Рис. 164. Принципиальная схема асинхронного тахогенератора

хронному двигателю с полым ротором. На статоре тахогенератора под углом 90° друг к другу размещаются две обмотки. Одна из

них включается в сеть переменного тока, а с зажимов другой снимается напряжение, пропорциональное скорости вращения ротора (рис. 164). Ротор тахогенератора представляет собой полый цилиндр из немагнитного материала с высоким удельным сопротивлением. Обычно для изготовления ротора используется фосфористая бронза. Ротор тахогенератора соединяется с валом агрегата, скорость которого нужно измерить. Асинхронные тахогенераторы, так же как и тахогенераторы постоянного тока, для получения линейной выходной характеристики выполняются с ненасыщенной магнитной системой.

Если к обмотке статора *1* приложить переменное напряжение $U_1$, имеющее постоянную амплитуду и постоянную частоту $f$, то в тахогенераторе возникнет пульсирующий магнитный поток $\Phi_d$. За счет этого потока в неподвижном роторе, как во вторичной обмотке трансформатора, будет наводиться э. д. с. $E_{тр}$. В статорной обмотке *2*, ось которой перпендикулярна оси продольного магнитного потока, э. д. с. индуктироваться не будет.

Так как ротор обладает почти чисто активным сопротивлением, ток $I_{тр}$, вызванный этой э. д. с., будет практически совпадать с ней по фазе. На рис. 164,*а* указано направление тока в роторе при изменении магнитного потока $\Phi_d$ от нуля до максимального значения. Как видно из рисунка, м. д. с. $F_{тр}$, обусловленная током $I_{тр}$, будет направлена по вертикальной оси тахогенератора навстречу потоку $\Phi_d$. Однако это не приведет практически к изменению величины магнитного потока $\Phi_d$, так как одновременно с появлением тока в роторе будет возрастать ток в статорной обмотке *1* тахогенератора.

Если теперь ротор тахогенератора привести во вращение со скоростью $n_2$, то в нем, кроме э. д. с. $E_{тр}$, будет индуктироваться э. д. с. вращения $E_{вр} = c_1 n_2 \Phi_d$. Эта э. д. с. вызовет в роторе ток $I_{вр}$, который будет практически совпадать с ней по фазе. Ток $I_{вр}$ создаст магнитный поток $\Phi_q$ по поперечной оси тахогенератора (рис. 164,*б*). За счет магнитного потока $\Phi_q$, неподвижного в пространстве и пульсирующего во времени с частотой питающей сети $f$, в обмотке *2* тахогенератора трансформаторным путем будет наводиться э. д. с.

$$E_2 = 4{,}44 w_2 f \Phi_q = c_2 \Phi_q = c_3 I_{вр} = c_4 E_{вр} = c_5 n_2 \Phi_d,$$

где $w_2$ — число витков обмотки *2*; $c_2$, $c_3$, $c_4$, $c_5$ — постоянные коэффициенты.

При подключении к обмотке *2* измерительного устройства с сопротивлением $z$ в цепи появится ток $I_2$. Так как магнитный поток $\Phi_d$ не зависит от режима работы тахогенератора, а определяется напряжением $U_1$ и частотой питающей сети $f$, частота тока в обмотке *2* будет равна частоте сети. Измерительные устройства обычно обладают значительным по величине активным сопротивлением ($z \approx r$), поэтому асинхронные тахогенерато-

ры работают в режиме, близком к холостому ходу. Следовательно,

$$U_2 \approx E_2 = c_5 n_2 \Phi_d = c n_2 U_1.$$

Если $U_1 = \text{const}$, то напряжение $U_2$ можно считать пропорциональным скорости вращения ротора. Иначе говоря, выходная характеристика асинхронного тахогенератора $U_2 = f(n_2)$ представляет собой зависимость, близкую к линейной.

## § 105. ПОВОРОТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Поворотные трансформаторы (сокращенно ПТ) служат для воспроизведения синусоидальной, косинусоидальной или линейной зависимости напряжения от угла поворота ротора. Они нашли широкое применение в автоматических и счетно-решающих системах.

Синусный ПТ по устройству аналогичен асинхронной электрической машине с фазным ротором. Статор и ротор ПТ набираются из листовой высоколегированной электротехнической стали. В пазах статора и ротора размещаются однофазные распределенные обмотки. Обмотка, включенная в однофазную сеть переменного тока, является первичной обмоткой ПТ, а обмотка, к которой присоединяется нагрузка, — вторичной. Первичной обмоткой ПТ может быть как обмотка статора, так и обмотка ротора. Ротор ПТ находится в заторможенном состоянии и поворачивается посредством специального редукторного устройства. ПТ выполняются с ненасыщенной магнитной системой.

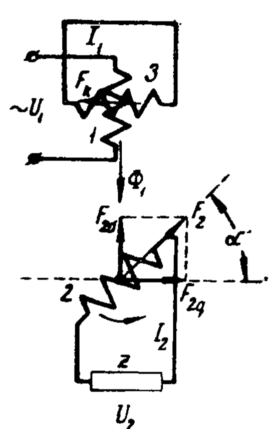



Рис. 165. Принципиальная схема синусного ПТ

Предположим, что первичная обмотка *1* синусного ПТ размещена на статоре, а вторичная обмотка *2* — на роторе (рис. 165). При включении первичной обмотки в сеть в ПТ будет создаваться пульсирующий магнитный поток $\Phi_1$, за счет которого во вторичной обмотке ПТ будет наводиться переменная э. д. с. $E_2$. Величина этой э. д. с. зависит не только от потока $\Phi_1$ и параметров обмотки *2*, но и от угла поворота ротора $\alpha$. Так как при повороте ротора коэффициент взаимоиндукции между первичной и вторичной обмотками ПТ изменяется по синусоидальному закону, действующее значение э. д. с., наводимой во вторичной обмотке, будет равно:

$$E_2 = E_{2\,макс} \sin \alpha,$$

где $E_{2\,макс}$ — действующее значение э. д. с., индуктируемой во вторичной обмотке ПТ, когда оси обеих обмоток совпадают, т. е. $\alpha = 90°$.

При включении нагрузки $z$ во вторичной цепи ПТ появляется ток $I_2$. М. д. с. $F_2$, созданная этим током, будет направлена по оси обмотки ротора и ее можно разложить на продольную $F_{2d}$ и поперечную $F_{2q}$ составляющие. Продольная составляющая м. д. с. $F_{2d}$ будет почти полностью скомпенсирована возрастающим током в первичной обмотке ПТ. Поперечная составляющая м. д. с. $F_{2q}$ не компенсируется. Она создает магнитный поток $\Phi_{2q}$ по поперечной оси ПТ, за счет которого в обмотке ротора наводится э. д. с. самоиндукции, вносящая искажения в синусоидальную зависимость вторичного напряжения ПТ от угла поворота ротора. Чтобы устранить эти искажения, на статоре ПТ перпендикулярно обмотке *1* иногда размещают дополнительную короткозамкнутую компенсационную обмотку *3*, м. д. с. которой $F_к$, действуя встречно относительно м. д. с. $F_{2q}$, компенсирует поперечный поток $\Phi_{2q}$.

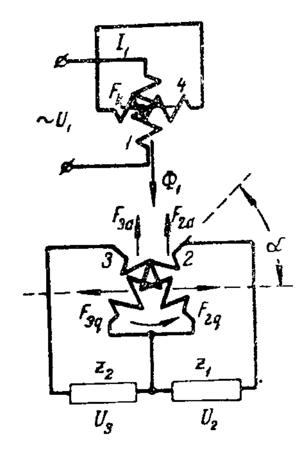



Рис. 166. Принципиальная схема синусно-косинусного ПТ

С и н у с н о - к о с и н у с н ы й ПТ в отличие от синусного ПТ имеет на роторе две обмотки, которые размещены под углом 90 друг к другу (рис. 166). Если к обмотке *1* подвести переменное напряжение и затем поворачивать ротор, то величина э. д. с., индуктируемой в обмотке *2*, будет пропорциональна $\sin\alpha$, а величина э. д. с., индуктируемой в обмотке *3* — $\cos\alpha$.

При включении нагрузки каждая из обмоток ротора синусно-косинусного ПТ будет создавать свою собственную м. д. с., которую так же, как и в предыдущем случае, можно разложить на продольную и поперечную составляющие. Продольные составляющие м. д. с. вторичных обмоток $F_{2d}$ и $F_{3d}$ будут компенсироваться соответствующим увеличением тока в первичной обмотке ПТ. Поперечные составляющие м. д. с. этих обмоток $F_{2q}$ и $F_{3q}$ имеют противоположные направления и при равных сопротивлениях нагрузки ($z_1 = z_2$) будут уравновешивать друг друга. Однако на практике не всегда можно обеспечить полную симметрию вторичных цепей, поэтому синусно-косинусные ПТ снабжаются дополнительной короткозамкнутой компенсационной обмоткой *4*, которая будет компенсировать поперечный магнитный поток ПТ, если он не равен нулю.

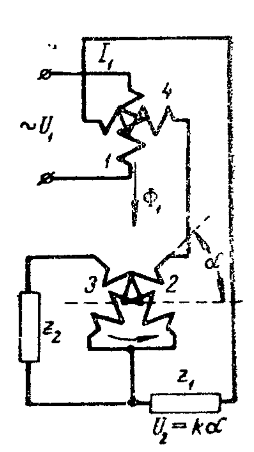



Рис. 167. Принципиальная схема линейного ПТ

Линейные ПТ, так же как и синусно-косинусные ПТ, имеют по две обмотки на статоре и на роторе, которые соединены по схеме, изображенной на рис. 167. Такое соединение обмоток позволяет получить линейную зависимость выходного напряжения ПТ от угла поворота ротора в пределах от +37° до —37°.

## § 106. СЕЛЬСИНЫ

Система синхронной связи служит для передачи угловых поворотов на расстоянии из одного пункта в другой при отсутствии механической связи между пунктами. Она состоит из нескольких электрически соединенных между собой электрических машин, из которых одни являются датчиками, а другие приемниками.

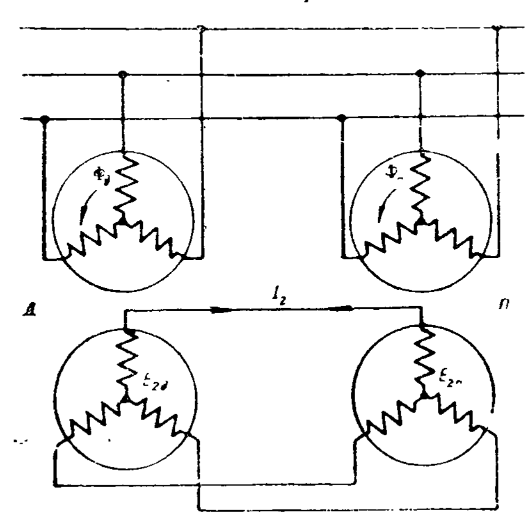



Рис. 168. Принципиальная схема включения трехфазных сельсинов

Электрические машины, применяемые в системах синхронной связи, называются сельсинами. Сельсины бывают трехфазные и однофазные.

Трехфазные сельсины по устройству аналогичны трехфазным асинхронным электрическим машинам с фазным ротором, имеющим на статоре и роторе трехфазные распределенные обмотки. На рис. 168 изображена схема синхронной связи, состоящая из двух трехфазных сельсинов — датчика *Д* и приемника *П*. Обмотки статоров обоих сельсинов получают питание от трехфазной сети переменного тока и создают в сельсинах вращающиеся магнитные потоки $Ф_д$ и $Ф_п$. Если роторы сельсинов занимают одинаковое положение относительно обмоток статоров, то вращающиеся магнитные потоки будут индуктировать в

роторных обмотках сельсинов равные по величине э. д. с. Так как обмотки роторов между собой соединены встречно, индуктированные э. д. с. пофазно компенсируют друг друга и токов в цепи роторов не будет.

При повороте ротора сельсина-датчика на угол $\gamma$ фазные э. д. с. роторов окажутся сдвинутыми по фазе на тот же угол. В результате этого между одноименными фазами сельсинов появятся разности э. д. с., которые вызовут в цепи роторов уравнительные токи. Эти токи в роторных обмотках сельсинов имеют противоположные направления, поэтому при взаимодействии с вращающимися магнитными потоками $\Phi_д$ и $\Phi_п$ они будут создавать вращающие моменты, действующие на роторы сельсинов в противоположные стороны. Поскольку ротор сельсина-датчика соединен с задающим механизмом и свободно вращаться не может, поворачиваться будет только ротор сельсина-приемника. В идеальном случае это будет происходить до тех пор, пока ротор сельсина-приемника не займет такое же положение относительно обмотки статора, как и ротор сельсина-датчика. Вследствие наличия моментов трения и нагрузки на валу сельсина-приемника между ротором сельсина-датчика и ротором сельсина-приемника всегда будет иметь место небольшой угол рассогласования $\theta$.

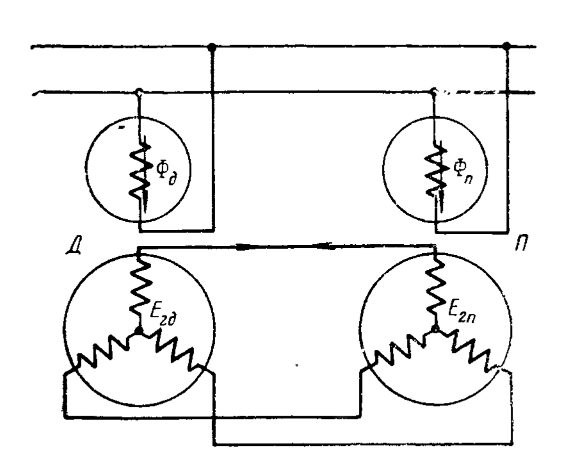


**Рис. 169. Принципиальная схема включения однофазных сельсинов**

Однофазные сельсины имеют одну однофазную обычно сосредоточенную обмотку и одну трехфазную распределенную обмотку. Однофазная обмотка располагается на статоре, а трехфазная обмотка на роторе или наоборот. Схема соединений однофазных сельсинов при работе их в схеме синхронной связи изображена на рис. 169. Сельсин *Д* является датчиком, сельсин *П* — приемником.

При включении однофазных обмоток в сеть переменного тока в каждом сельсине будет существовать свой магнитный поток, пульсирующий с частотой сети, который будет индуктировать в фазах трехфазной обмотки э. д. с. Эти э. д. с. будут совпадать по фазе, но отличаться по величине, поскольку величина их зависит от расположения фазы относительно оси магнитного потока. При совпадении оси фазы с осью магнитного потока в фазе будет наводиться

максимальная э. д. с. Если угол между указанными осями будет 90°, э. д. с. в фазе будет равна нулю.

Если роторы сельсинов занимают одинаковое положение относительно статорных обмоток, то э. д. с., наводимые в одноименных фазах трехфазных обмоток, будут равны по величине и при соответствующем соединении этих обмоток противоположны по направлению. В этих условиях токи во вторичной цепи сельсинов будут отсутствовать.

При повороте ротора сельсина-датчика на угол $\gamma$ э. д. с., индуктируемые пульсирующим магнитным потоком в фазах его трехфазной обмотки, изменяются по величине и во вторичной цепи сельсинов появляются уравнительные токи. Эти токи, взаимодействуя с пульсирующими магнитными потоками сельсинов, будут создавать вращающие моменты, стремящие привести роторы в одинаковое положение. Так как ротор сельсина-датчика закреплен, поворачиваться в сторону уменьшения угла рассогласования будет только ротор сельсина-приемника.

В современной автоматике широкое применение получили системы синхронной связи с однофазными сельсинами. Они, например, используются для передачи показаний приборов на расстояние, для дистанционного управления агрегатами летательных аппаратов и т. д. Трехфазные системы синхронной связи чаще используются в промышленном электроприводе для синхронизации валов двух или нескольких приводных двигателей.

## § 107. ШАГОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В последнее время в различных автоматических системах с программным управлением получили широкое применение **шаговые двигатели** (сокращенно ШД). По своему устройству и принципу работы ШД напоминают синхронные двигатели, только в последних магнитное поле и ротор вращаются непрерывно с постоянной скоростью, а в ШД они перемещаются отдельными скачками (шагами). **Шагом** называют угол, на который поворачивается ротор ШД при подаче в обмотку управления управляющего импульса.

Одним из наиболее перспективных ШД является двигатель с двумя управляющими обмотками на статоре и ротором, выполненным в виде звездообразного постоянного магнита. Число полюсов у ротора ШД в два раза меньше, чем число зубцов у статора. Питание обмоток управления осуществляется от источника постоянного тока через специальный коммутатор.

Магнитное поле в воздушном зазоре ШД создается за счет результирующей м. д. с. управляющих обмоток. На рис. 170, *а* представлены развернутая схема обмоток и графики распределения м. д. с. в воздушном зазоре ШД. М. д. с. $F_I$ создается обмоткой I, а м. д. с. $F_{II}$ — обмоткой II. Результирующая м. д. с. $F$ получается в результате сложения м. д. с. $F_I$ и $F_{II}$.

При изменении направления тока в одной из обмоток управления, например в обмотке II, изменяется направление м.д.с. $F_{\text{II}}$

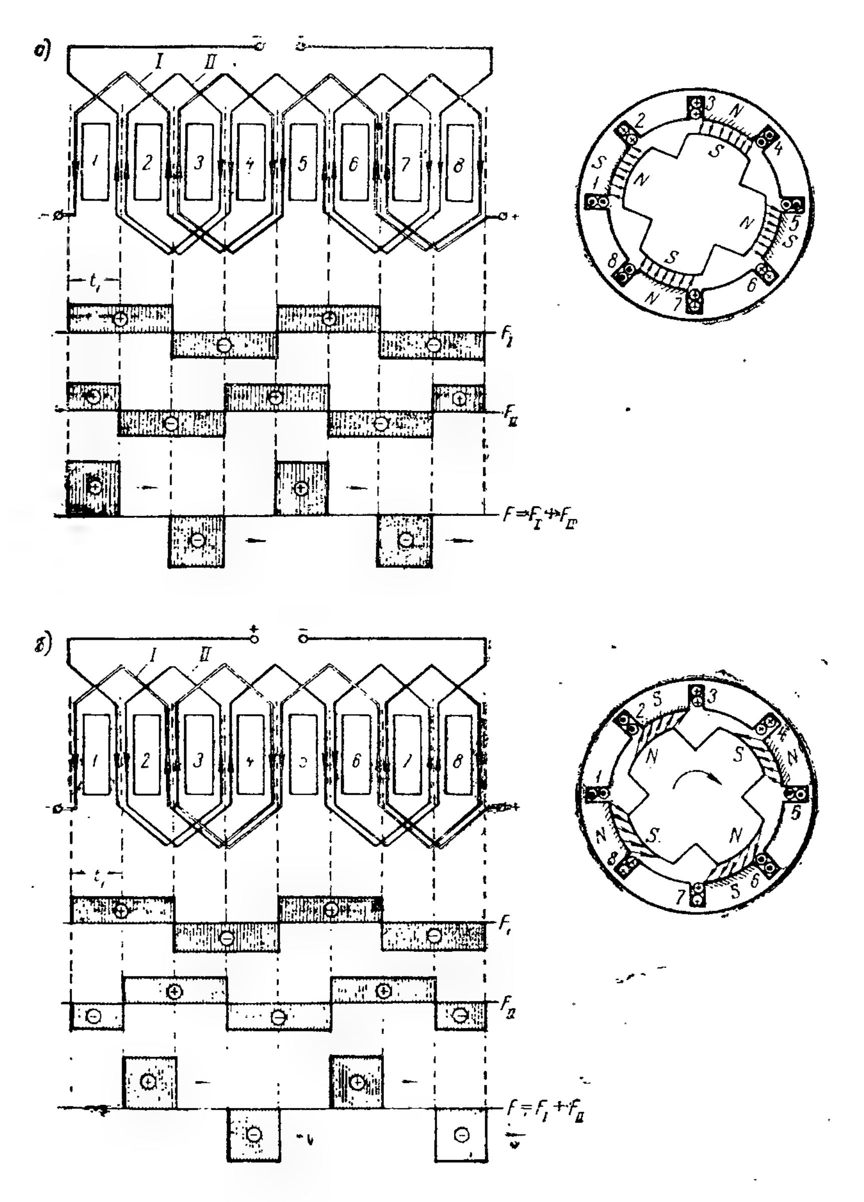



Рис. 170. Принцип работы шагового двигателя

и ось результирующей м. д. с. $F$ в воздушном зазоре ШД смещается на одно зубцовое деление $t_1$ (рис. 170,*б*). Это приводит

к смещению магнитного поля в воздушном зазоре ШД и соответственно к повороту ротора на один шаг. При последовательном изменении направления тока в управляющих обмотках с помощью коммутатора магнитный поток в воздушном зазоре ШД будет перемещаться скачками и вслед за ним скачками будет поворачиваться ротор. При этом число шагов, отработанных ротором, будет равно числу переключений, произведенных коммутатором.

---

*ГЛАВА XIII*

# ИНДУКТОРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

## § 108. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Индукторные генераторы находят широкое применение на летательных аппаратах для питания приборов систем автоматического управления и радиолокационной аппаратуры, а также в наземных установках для питания специальных устройств.

Конструкция генератора индукторного типа представлена на рис. 171. Зубцовый пакет статора набирается из отдельных изолированных друг от друга листов легированной электротехнической стали. На шести зубцах пакета размещается шесть катушек, которые соединяются между собой последовательно. Эти катушки образуют обмотку якоря генератора. Зубцовый пакет статора запрессовывается в стальной цилиндрический корпус из низкоуглеродистой электротехнической стали.

Роторный зубцовый пакет также выполняется шихтованным из листовой легированной электротехнической стали. Пакет напрессовывается на стальной массивный сердечник, который, в свою очередь, насаживается на вал. В отличие от пакета статора роторный пакет имеет только три зубца.

Магнитный поток в генераторе создается обмоткой возбуждения, размещенной на коническом выступе стального подшипникового щита, который одновременно является и частью магнитопровода электрической машины. Выступ выполняется с целью снижения величины м. д. с. возбуждения, необходимой для проведения магнитного потока через так называемый нерабочий воздушный зазор машины. Магнитный поток возбуждения генератора проходит вдоль оси ротора, через зубцы ротора, рабочий воздушный зазор, зубцы статора, корпус, подшипниковый щит и нерабочий зазор машины.

При вращении ротора проводимость воздушного зазора под каждым зубцом статора будет периодически изменяться. В ре-

зультате этого будет изменяться величина магнитного потока, охватывающего каждую статорную катушку, и в катушках будет наводиться переменная э. д. с. Полный период изменения магнитного потока в зубце статора определяется временем смещения ротора на одно зубцовое деление, поэтому частота переменной э. д. с., наводимой в обмотке якоря, определяется скоростью вращения ротора и числом его зубцов

$$f = \frac{Z_p n}{60}.$$

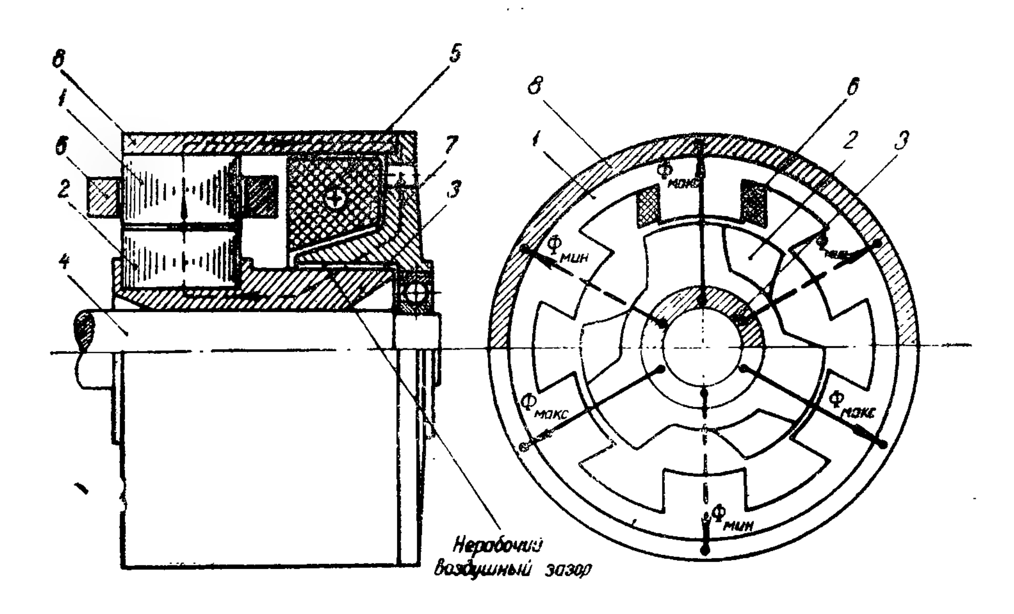



Рис. 171. Устройство индукторного генератора:
*1*—зубцовый пакет статора; *2*—зубцовый пакет ротора; *3*—сердечник ротора; *4*—вал; *5*—обмотка возбуждения; *6*—катушка обмотки якоря; *7*—подшипниковый щит; *8*—корпус

Если учесть, что частота переменного тока, используемого для питания потребителей летательных аппаратов, 400 *гц*, то при $Z_p = 3$ номинальная скорость вращения у индукторных генераторов должна быть равна 8000 *об/мин*. По условиям надежности такая сравнительно высокая скорость вращения вполне допустима для индукторных генераторов, так как у них ротор не имеет обмотки и отсутствуют вращающиеся контактные устройства.

## § 109. Э. Д. С. ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Магнитный поток возбуждения индукторного генератора можно представить состоящим из ряда элементарных потоков. Если пренебречь магнитной проводимостью впадин статора, то число

элементарных магнитных потоков будет соответствовать числу зубцов статора. Каждый элементарный магнитный поток замыкается по отдельной магнитной цепи, которая включает в себя ротор, воздушный зазор, зубец статора, корпус, подшипниковый щит и нерабочий воздушный зазор (см. рис. 171).

При вращении ротора проводимость λ каждой магнитной цепи будет изменяться. По мере того как зубец ротора будет выходить из под зубца статора, λ будет убывать. В момент, когда против зубца статора будет находиться впадина ротора, λ будет минимальной. Далее λ будет снова возрастать до максимальной величины. Магнитная система индукторного генератора слабо насыщена, поэтому проводимость магнитной цепи зависит в основном от проводимости воздушного зазора, которая, в свою очередь, пропорциональна площади взаимного перекрытия зубцов статора и ротора (рис. 172).

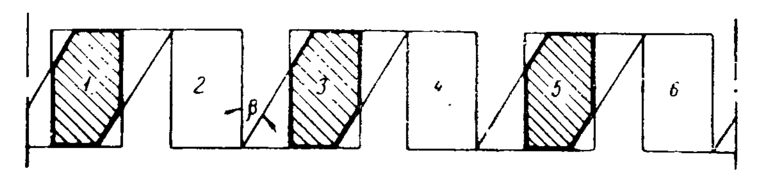



Рис. 172. Развернутая схема зубцов статора и ротора

Магнитный поток, охватывающий отдельную катушку статора, равен:

$$\Phi_к = \lambda F_в,$$

где $F_в$ — м. д. с. обмотки возбуждения.

Так как м. д. с. $F_в = \text{const}$, то закон изменения магнитного потока $\Phi_к$ определяется только проводимостью воздушного зазора, зависящей от геометрии зубцов статора и ротора. Чтобы обеспечить синусоидальную форму кривой магнитного потока, у индукторных генераторов подбирают соответствующим образом поперечные размеры зубцов статора и ротора и, кроме того, зубцы ротора скашивают относительно зубцов статора на определенный угол β. Благодаря скосу зубцов ротора при любом положении ротора общая проводимость всей магнитной цепи генератора и, следовательно, его поток возбуждения не изменяются, что позволяет все части магнитной цепи генератора, кроме зубцовых пакетов статора и ротора, выполнять массивными.

На рис. 173 изображены кривые изменения магнитной проводимости и магнитного потока для нечетных (кривая *1*) и для четных (кривая *2*) зубцов статора, а также кривые э. д. с., наводимых в катушках этих зубцов.

Так как магнитные потоки, охватывающие катушки двух соседних зубцов статора, находятся в противофазе, э. д. с., наводимые в них, отличаются только знаком. Поэтому, чтобы осуществить

арифметическое сложение этих э. д. с., катушки соседних зубцов необходимо включить навстречу друг другу (рис. 174).

Среднее значение э. д. с. катушки с числом витков $w_к$ определяется по известной формуле

$$E_{к\,ср} = \frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} e_к dt = -\frac{2}{T} w_к \int_0^{T/2} d\Phi_к = \frac{2w_к}{T}(\Phi_{t=0} - \Phi_{t=T/2}).$$

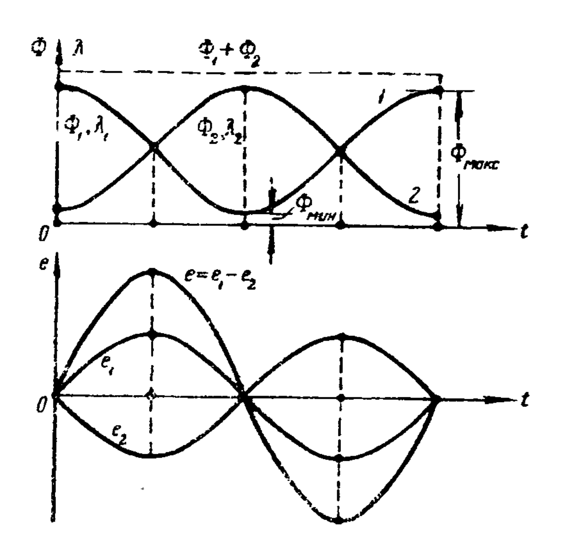



Рис. 173. Кривые изменения магнитной проводимости, потоков и э. д. с. при холостом ходе индукторного генератора

Если катушка размещена на одном из нечетных зубцов, то при $t = 0$ $\Phi = \Phi_{макс}$; при $t = T/2$ $\Phi = \Phi_{мин}$, следовательно,

$$E_{к\,ср} = \frac{2w_к}{T}(\Phi_{макс} - \Phi_{мин}) = 2w_к f(\Phi_{макс} - \Phi_{мин}),$$

где $f = 1/T$ — частота изменения э. д. с.

Действующее значение э. д. с. катушки

$$E_к = E_{к\,ср} k_ф = 2k_ф w_к f(\Phi_{макс} - \Phi_{мин}).$$

Здесь $k_ф$ — коэффициент, учитывающий форму кривой э. д. с., который у индукторных генераторов обычно равен 1,15.

Так как все катушки обмотки якоря индукторного генератора соединяются между собой последовательно, э. д. с. генератора при холостом ходе будет равна:

$$E = 2k_ф w_к Z_c f(\Phi_{макс} - \Phi_{мин}) = 2{,}3wf(\Phi_{макс} - \Phi_{мин}),$$

где $Z_c$ — число зубцов статора;

$w = w_к Z_c$ — число витков обмотки якоря.

Обычно $\Phi_{мин} = (0{,}05 \div 0{,}1)\,\Phi_{макс}$, поэтому, если положить $\Phi_{мин} \approx 0$, то

$$E = 2{,}3 w f \Phi_{макс}.$$

Сравнивая это выражение с формулой э. д. с. обычного синхронного генератора, можно заключить, что в индукторном генераторе значительно хуже используется магнитный поток, чем в синхронном генераторе нормального исполнения. Однако, несмотря на это, благодаря простой и надежной конструкции, отсутствию вращающихся обмоток и скользящих контактов, индукторные генераторы

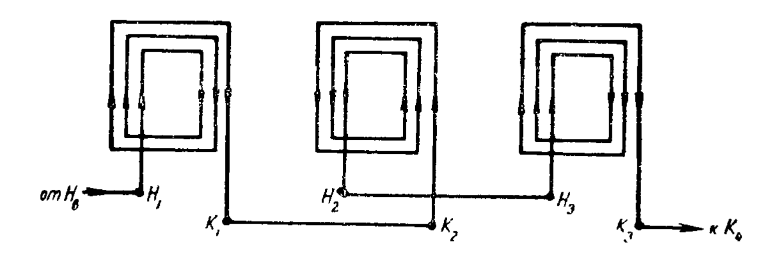



Рис. 174. Схема соединения катушек обмотки якоря

широко используются на летательных аппаратах. Как показывает практика, при мощности до 1500 *вт* индукторные генераторы имеют практически такой же вес, как и обычные синхронные генераторы.

В последнее время на беспилотных объектах получили применение генераторы индукторного типа с возбуждением от постоянных магнитов. Эти генераторы, как правило, приводятся во вращение от воздушных и газовых турбин со скоростью 20000—120000 *об/мин*. Частота у них достигает 1000—15000 *гц*.

## § 110. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНДУКТОРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Характеристика холостого хода индукторного генератора $E_0 = f(I_в)$ при $I = 0$ и $n = \text{const}$ отличается от характеристики холостого хода обычного синхронного генератора тем, что при значительных токах возбуждения она начинает загибаться вниз (рис. 175). Такой несколько необычный вид этой кривой объясняется тем, что при сильном насыщении зубцов статора и ротора магнитный поток $\Phi_{макс}$ растет медленнее, чем поток $\Phi_{мин}$.

В результате этого разность потоков $\Delta\Phi = \Phi_{макс} - \Phi_{мин}$ уменьшается и величина э. д. с. падает.

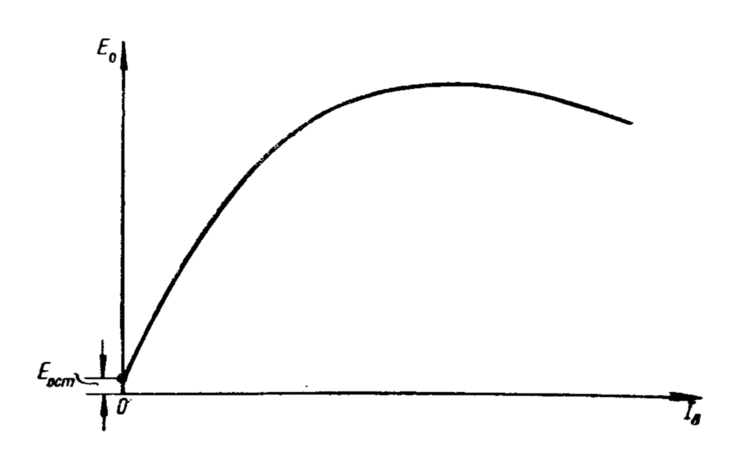



Рис. 175. Характеристика холостого хода индукторного генератора

Внешние и регулировочные характеристики индукторного генератора имеют такой же вид, как у обычных синхронных генераторов.

---

ГЛАВА XIV

# ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## § 111. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Преобразователи постоянного тока служат для преобразования постоянного тока низкого напряжения в постоянный ток высокого напряжения. Применяются они для питания анодных цепей электронных ламп радиоустройств летательных аппаратов и поэтому часто называются радиопреобразователями или радиоумформерами. Распространение получили преобразователи постоянного тока двух типов: РУ и РУК.

Преобразователи типа РУ представляют собой одноякорную машину постоянного тока с двумя самостоятельными якорными обмотками, которые укладываются в общие пазы якоря. Обмотка низкого напряжения (НН) обычно размещается в верхней части паза, а обмотка высокого напряжения (ВН) — в нижней части паза. Каждая обмотка якоря присоединяется к своему коллектору. Преобразователи имеют двухполюсную магнитную систему. На

полюсах размещается обмотка возбуждения, которая приключается к зажимам низкого напряжения. Таким образом, со стороны низкого напряжения преобразователи типа РУ представляют собой двигатель постоянного тока параллельного возбуждения, а со стороны высокого напряжения — генератор постоянного тока независимого возбуждения. Принципиальная электрическая схема преобразователя типа РУ изображена на рис. 176, *а*.

Преобразователи типа РУК (каскадные) имеют три якорные обмотки: одну обмотку низкого напряжения и две обмотки высокого напряжения, которые укладываются в одни и те же пазы якоря. Каждая обмотка якоря имеет свой коллектор. Коллекторы обмоток высокого напряжения соединены между собой последова-

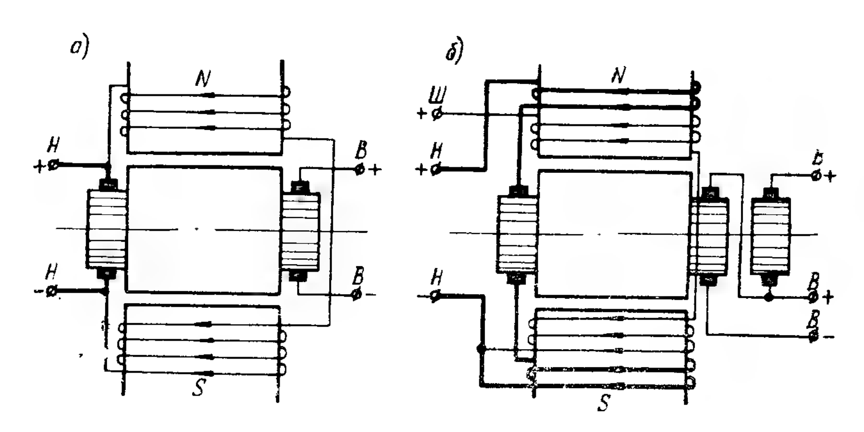
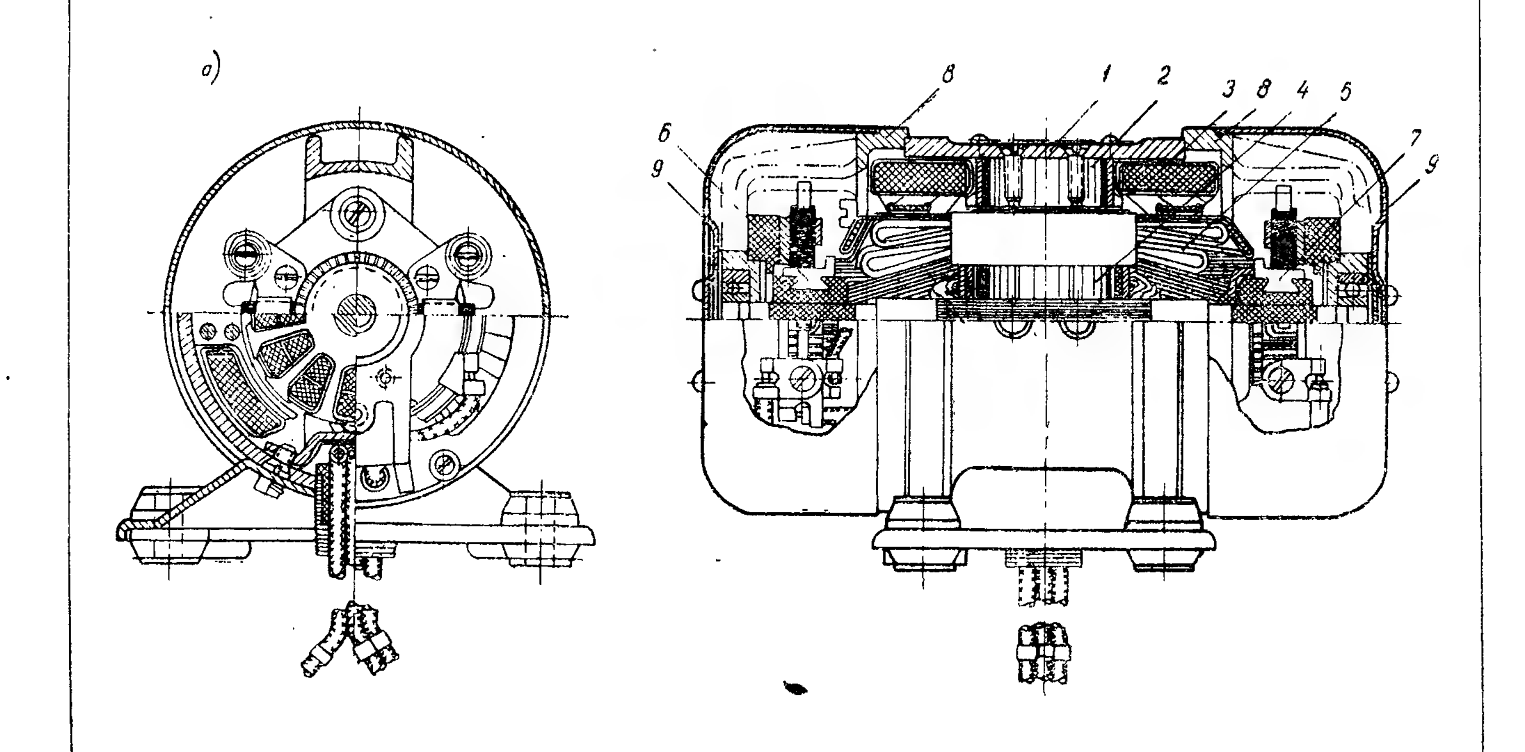



Рис. 176. Принципиальные электрические схемы преобразователей постоянного тока:
а) преобразователь типа РУ; б) преобразователь типа РУК

тельно, что позволяет получить у преобразователя две ступени высокого напряжения (рис. 176, *б*). Преобразователи имеют две обмотки возбуждения — параллельную и последовательную, которые размещаются на двух полюсах. Чтобы при пуске преобразователя обеспечить наибольший пусковой момент, обмотка параллельного возбуждения присоединяется непосредственно к зажимам низкого напряжения, т. е. включается под полное напряжение бортовой сети летательного аппарата. Для уменьшения величины пускового тока, пуск преобразователя типа РУК обычно осуществляется с помощью одноступенчатого пускового реостата сопротивлением 1 *ом*. Благодаря этому пусковой ток преобразователя снижается более чем в десять раз. На время работы преобразователя пусковой реостат шунтируется.

Корпуса преобразователей постоянного тока изготовляются из цельнотянутых стальных труб с малым содержанием углерода, обладающих высокой магнитной проницаемостью. Полюса набираются из листовой низкоуглеродистой электротехниче-


а)
8
1
2
3
8
4
5
6
9
7
9

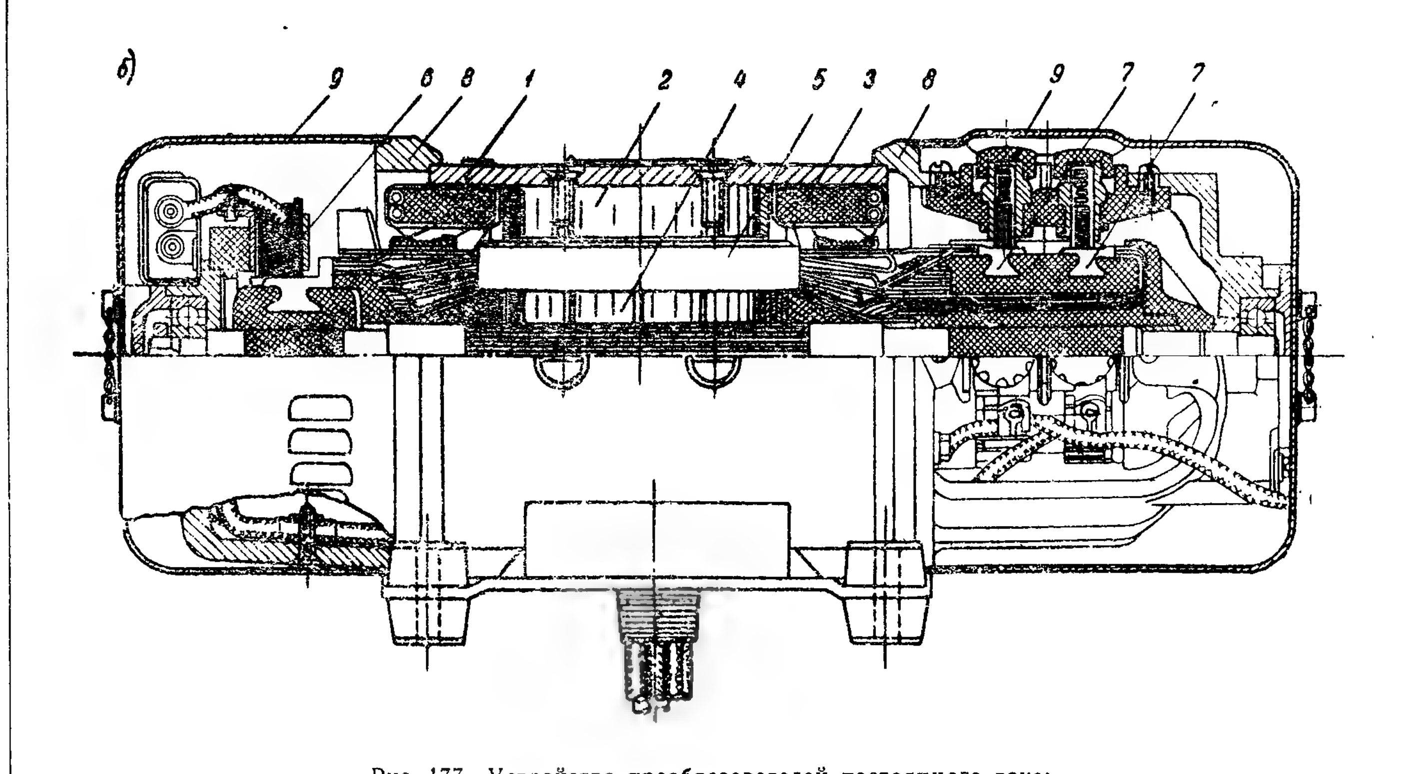



Рис. 177. Устройство преобразователей постоянного тока:
а) продольный и поперечный разрезы преобразователя типа РУ; б) продольный разрез преобразователя типа РУК:
*1*—корпус; *2*—полюс; *3*—обмотка возбуждения; *4*—пакет якоря; *5*—обмотка якоря; *6*—коллектор низкого напряжения; *7*—коллектор высокого напряжения; *8*—подшипниковый щит; *9*—колпак

ской стали и имеют очень развитые полюсные наконечники, на которых размещаются катушки из круглого обмоточного провода с эмалевой изоляцией. Якори набираются из листовой легированной электротехнической стали. Обмотки якоря низкого и высокого напряжения наматываются круглым обмоточным эмалированным проводом с шелковой изоляцией. Коллекторы преобразователей выполняются на пластмассовой основе. К корпусам преобразователей с помощью винтов крепятся подшипниковые щиты из алюминиевого сплава, на которых укрепляются пластмассовые суппорты со щеткодержателями. Для защиты от механических повреждений, а также от влаги преобразователи с обеих сторон закрываются алюминиевыми колпаками. Для охлаждения преобразователи обычно снабжаются вентиляторами.

На рис. 177 представлены конструкции преобразователей постоянного тока РУ-11А (радиоумформер с расчетной мощностью 11 *вт*) и РУК-300А (радиоумформер каскадный с расчетной мощностью 300 *вт*), получивших широкое применение на летательных аппаратах.

Принцип действия преобразователя постоянного тока заключается в следующем. При включении преобразователя в бортовую сеть летательного аппарата по обмотке якоря низкого напряжения будет протекать ток $I_1$, который, взаимодействуя с магнитным потоком возбуждения Ф, будет создавать вращающий момент. За счет этого момента якорь преобразователя придет во вращение. При вращении якоря в его обмотках будут наводиться э. д. с. $E_1$ и $E_2$. Э. д. с. $E_1$, наводимая в обмотке якоря низкого напряжения, будет направлена навстречу току $I_1$ и, следовательно, как в обычном двигателе постоянного тока, будет являться противо-э. д. с. Величина ее может быть определена по известной формуле

$$E_1 = \frac{p}{60} \frac{N_1}{a_1} n\Phi,$$

где $p$ — число пар полюсов;

$N_1$ — число активных проводников обмотки НН;

$a_1$ — число пар параллельных ветвей обмотки НН;

$n$ — скорость вращения якоря.

Э. д. с. $E_2$, наводимая в обмотке якоря высокого напряжения, будет иметь то же направление, что и э. д. с. $E_1$, но величина ее будет равна:

$$E_2 = \frac{p}{60} \frac{N_2}{a_2} n\Phi,$$

где $N_2$ — число активных проводников обмотки ВН;

$a_2$ — число пар параллельных ветвей обмотки ВН.

При подключении нагрузки к зажимам ВН в цепи якоря высокого напряжения появится ток $I_2$.

Преобразователи обычно имеют двухполюсное исполнение, поэтому $p = 1$, $a_1 = a_2 = 1$ и, следовательно,

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{N_2}{N_1}.$$

В режиме холостого хода ток, потребляемый преобразователем из сети, мал и падение напряжения в цепи якоря низкого напряжения невелико, в связи с этим $U_1 \approx E_1$ и

$$\frac{U_2}{U_1} \approx \frac{N_2}{N_1}.$$

Таким образом, при холостом ходе напряжение на зажимах ВН преобразователя есть постоянная величина, определяемая отношением числа активных проводников обмоток высокого и низкого напряжения.

В таблице 9 приведены номинальные данные некоторых серийных преобразователей постоянного тока.

*Таблица 9*

| Тип преобразователя | | РУ-11АМ | РУ-45А | РУК-300А | РУК-300Б |
|---|---|---|---|---|---|
| Номинальная мощность, *вт* | | 11 | 45 | 300 | 300 |
| Номинальное напряжение, *в* | на стороне НН | 27 | 27 | 27 | 27 |
| | „ „ ВН | 235 | 465 | 790/1580 | 365/1070 |
| Номинальный ток, *а* | „ „ НН | 1,6 | 4,4 | 22,5 | 22,5 |
| | „ „ ВН | 0,05 | 0,1 | 0,1/0,15 | 0,15/0,25 |
| Скорость вращения, *об/мин* | | 7000 | 9000 | 9000 | 9000 |
| К. п. д., % | | 27 | 39 | 52 | 52 |
| Вес не более, *кг* | | 1,3 | 2,0 | 7,8 | 7,8 |

## § 112. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Предположим, что к зажимам НН преобразователя приложено напряжение питающей сети $U_1$ и ток в обмотке якоря низкого напряжения $I_1$ имеет направление, указанное на рис. 178. Тогда согласно правилу левой руки якорь преобразователя будет вращаться против часовой стрелки. При вращении в обмотке якоря высокого напряжения будет наводиться э. д. с. $E_2$, направление которой можно определить по правилу правой руки. Эта э. д. с. в случае подключения к зажимам ВН нагрузки $R$ вызовет в цепи высокого напряжения ток $I_2$, который по направлению будет совпадать

с э. д. с. $E_2$. Поскольку токи в обмотках якоря низкого и высокого напряжения противоположны по направлению, магнитные потоки, создаваемые ими, будут направлены навстречу друг другу.

Выясним, в какой степени поле, создаваемое обмоткой якоря высокого напряжения, компенсирует поле обмотки якоря низкого напряжения.

Известно, что вращающий момент, создаваемый в результате взаимодействия тока $I_1$ и магнитного потока возбуждения Ф, будет равен:

$$M_1 = c_{M1} I_1 \Phi.$$

Наличие в обмотке якоря высокого напряжения тока $I_2$ и взаимодействие его с магнитным потоком Ф в свою очередь обусловливает появление электромагнитного момента

$$M_2 = c_{M2} I_2 \Phi,$$

который будет противоположен по направлению вращающему моменту $M_1$.

Таким образом, в установившемся режиме работы для преобразователя постоянного тока будет иметь место следующее уравнение моментов:

$$M_1 = M_0 + M_2,$$

где $M_0$ — вращающий момент, который развивает преобразователь постоянного тока без нагрузки, т. е. при токе холостого хода в обмотке якоря низкого напряжения ($I_1 = I_0$); величина этого момента определяется главным образом механическими потерями и отчасти потерями в стали.

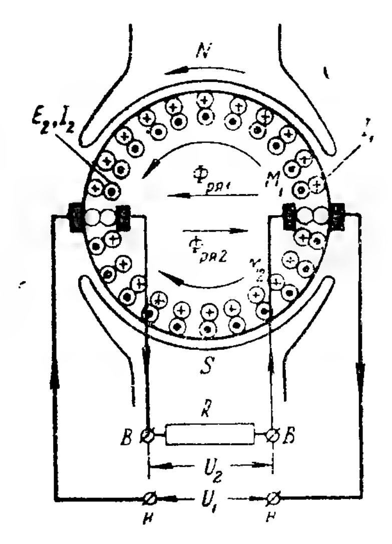



Рис. 178. Направление тока в обмотках якоря преобразователя постоянного тока

Следовательно,

$$c_{M1} I_1 \Phi = c_{M1} I_0 \Phi + c_{M2} I_2 \Phi$$

или

$$\frac{1}{2\pi} p \frac{N_1}{a_1} I_1 \Phi = \frac{1}{2\pi} p \frac{N_1}{a_1} I_0 \Phi + \frac{1}{2\pi} p \frac{N_2}{a_2} I_2 \Phi.$$

Так как $a_1 = a_2$, то после сокращения имеем:

$$I_1 \frac{N_1}{2} = I_0 \frac{N_1}{2} + I_2 \frac{N_2}{2}.$$

Если учесть, что $\frac{N_1}{2}$ представляет собой число витков обмотки якоря низкого напряжения $w_1$, а $\frac{N_2}{2}$ — число витков обмотки якоря высокого напряжения $w_2$, то можно написать:

$$I_1 w_1 = I_0 w_1 + I_2 w_2 \quad \text{или} \quad F_1 = F_0 + F_2.$$

Из полученного выражения видно, что м. д. с. обмотки якоря высокого напряжения $F_2$ всегда меньше м. д. с. обмотки якоря низкого напряжения $F_1$ на величину м. д. с. обмотки якоря низкого напряжения при холостом ходе $F_0$. Иначе говоря, в преобразователе постоянного тока имеет место неполная компенсация реакции якоря.

Потери холостого хода, как известно, почти не зависят от нагрузки, поэтому можно считать, что величина поля реакции якоря при изменении нагрузки практически остается постоянной. Это означает, что кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре преобразователя сохраняет свою форму во всех режимах его работы. Малая величина поля реакции якоря и отсутствие искажающего действия этого поля на поле возбуждения обеспечивают хорошие условия для безыскровой коммутации. Кроме того, в связи с тем, что токи в активных сторонах секций, размещенных в одном и том же пазу, имеют противоположное направление, реактивная э. д. с., наводимая в коммутирующих секциях преобразователя, будет меньше, чем у обычных электрических машин постоянного тока. Это также благоприятно сказывается на коммутации. Благоприятные условия коммутации позволяют обходиться в преобразователе постоянного тока без дополнительных полюсов и щетки размещать на геометрической нейтрали машины.

## § 113. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 1. Рабочие характеристики

Рабочими характеристиками преобразователя называют зависимости потребляемого тока, скорости вращения, высокого напряжения и коэффициента полезного действия от изменения тока нагрузки при постоянной величине питающего напряжения, т. е.

$$I_1,\ n,\ U_2,\ \eta = f(I_2) \text{ при } U_{1н} = \text{const}.$$

При увеличении нагрузки $I_2$ увеличивается электромагнитный тормозной момент $M_2$. В результате этого равенство моментов нарушается: $M_1 < M_0 + M_2$ и скорость вращения преобразователя начинает падать. При снижении скорости вращения противо-э.д.с. $E_1$, наводимая в обмотке якоря низкого напряжения, уменьшается и, следовательно, ток $I_1$, потребляемый преобразователем

из сети, и вращающий момент $M_1$ увеличиваются. Переходный процесс заканчивается тогда, когда снова восстанавливается равенство моментов, т. е. $M_1 = M_0 + M_2$.

Из уравнения м. д. с. преобразователя следует

$$I_1 = I_0 + I_2 \frac{w_2}{w_1}.$$

Так как ток холостого хода преобразователя $I_0 \approx \text{const}$, то зависимость $I_1 = f(I_2)$ представляет собой прямую линию (рис. 179,*а*).

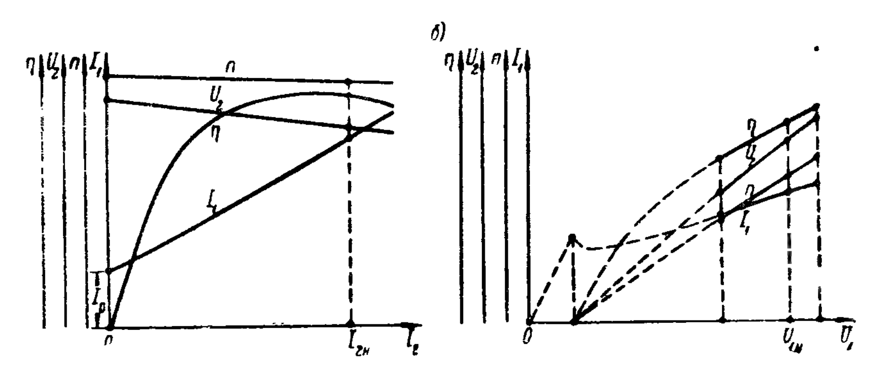


Рис. 179. Характеристики преобразователя постоянного тока: а) рабочие характеристики; б) эксплуатационные характеристики

Скорость вращения преобразователя с ростом нагрузки уменьшается примерно по линейному закону. Объясняется это увеличением омического падения напряжения в цепи якоря низкого напряжения.

Внешняя характеристика преобразователя $U_2 = f(I_2)$ также имеет вид прямой линии, однако угол наклона к оси абсцисс у нее будет больше, чем у характеристики $n = f(I_2)$, так как напряжение $U_2$ будет изменяться не только вследствие увеличения падения напряжения в цепи якоря высокого напряжения, но благодаря некоторому снижению скорости вращения преобразователя. Причем следует заметить, что применение смешанного возбуждения не делает внешнюю характеристику преобразователя более мягкой, так как при увеличении нагрузки одновременно со снижением скорости вращения увеличивается магнитный поток возбуждения.

У преобразователей постоянного тока величина процентного изменения напряжения достигает 15—20%. Столь значительное изменение выходного напряжения безусловно является существенным недостатком преобразователей напряжения. Однако, несмотря на это, у них не применяется регулирование выходного напряжения. Объясняется это тем, что наиболее экономичный спо-

соб регулирования путем воздействия на ток возбуждения не дает эффекта, поскольку при этом изменяется не только магнитный поток преобразователя, но и скорость его вращения, в связи с чем величина выходного напряжения практически остается постоянной. Другие способы регулирования выходного напряжения такие, как изменение напряжения, подводимого к преобразователю, или введение сопротивления в цепь высокого напряжения, усложняют конструкцию, увеличивают вес и существенным образом снижают и без того низкий коэффициент полезного действия преобразователя.

Кривая $\eta = f(I_2)$ имеет такой же вид, как у обычных электрических машин постоянного тока.

### 2. Эксплуатационные характеристики

Эксплуатационными характеристиками преобразователя называют зависимости потребляемого тока, скорости вращения, высокого напряжения и коэффициента полезного действия от величины питающего напряжения при постоянном сопротивлении нагрузки:

$$I_1,\ n,\ U_2,\ \eta = f(U_1) \text{ при } R = R_н = \text{const}.$$

В условиях эксплуатации напряжение, подводимое к преобразователю, не остается постоянным, а изменяется примерно в пределах $\pm$ 10% от номинальной величины. В связи с этим эксплуатационные характеристики, позволяющие оценить рабочие свойства преобразователя в зависимости от величины питающего напряжения, имеют большое практическое значение. Примерный вид этих характеристик изображен на рис. 179,*б*. Из приведенного графика видно, что при изменении напряжения $U_1$ в диапазоне от 22 до 30 *в* ток $I_1$, скорость вращения $n$, выходное напряжение $U_2$ и коэффициент полезного действия $\eta$ изменяются примерно по линейному закону.

## § 114. ПУЛЬСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЯ И ФИЛЬТРЫ

При работе преобразователь постоянного тока создает помехи, которые могут нарушать нормальную работу радиотехнических устройств летательного аппарата. Помехи возникают вследствие пульсаций выходного напряжения преобразователя и искрения на коллекторах высокого и низкого напряжения.

Причиной пульсаций напряжения является наличие конечного числа коллекторных пластин (см. § 2) и зубчатое строение якоря. При вращении якоря число зубцов под полюсом периодически изменяется (рис. 180). Это приводит к периодическому изменению проводимости магнитной цепи электрической машины, а следовательно, и к изменению величины ее магнитного потока. Наличие

пульсирующего потока обусловливает появление в выходном напряжении преобразователя переменной составляющей с частотой

$$f_2 = \frac{Zn}{60},$$

где $Z$ — число зубцов якоря.

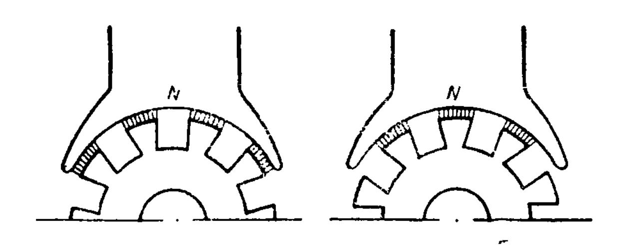



Рис. 180. Пульсации магнитного потока в воздушном зазоре

Коллекторные и зубцовые пульсации имеют невысокую частоту по сравнению с частотой, используемой в радиотехнических устройствах, поэтому их называют низкочастотными пульсациями. Источником помех высокой частоты является искрение на коллекторах высокого и низкого напряжения, возникающее в процессе коммутации. Частота их определяется частотой электрических разрядов под щетками.

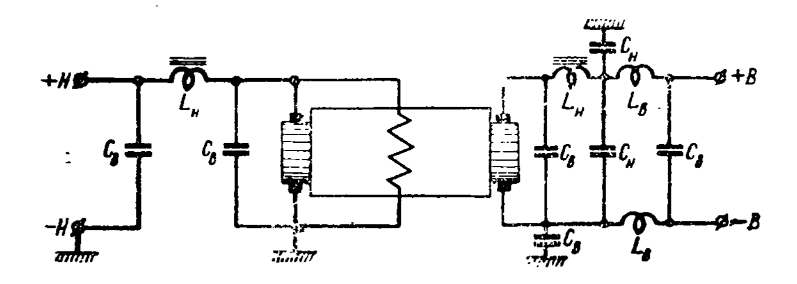



Рис. 181. Принципиальная электрическая схема преобразователя типа РУ с коробкой фильтров

Чтобы снизить до минимума величину зубцовых пульсаций, якори современных преобразователей выполняются с нечетным числом зубцов и скошенными полузакрытыми пазами. Кроме того, для сглаживания пульсаций напряжения и снижения уровня радиопомех преобразователи напряжения снабжаются низкочастотными и высокочастотными фильтрами, состоящими из дросселей и

конденсаторов, которые ограничивают проникновение переменных токов (низкой и высокой частоты) в цепи питания радиотехнических устройств.

На рис. 181 в качестве примера приведена принципиальная электрическая схема преобразователя постоянного тока типа РУ с коробкой фильтров. Низкочастотный фильтр состоит из дросселей со стальными сердечниками $L_н$ и конденсаторов сравнительно большой емкости $C_н$. Высокочастотный фильтр включает в себя дроссели без сердечников $L_в$ и конденсаторы $C_в$.

---

## ГЛАВА XV

# ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННО-ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### § 115. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

Современные летательные аппараты, кроме потребителей постоянного тока, имеют значительное число потребителей, для питания которых требуется переменный ток. К таким потребителям относятся гироскопические приборы, радиолокационные станции, радиокомпасы, следящий привод управления стрелково-пушечным оружием, автопилоты и другие устройства.

Для питания большинства потребителей переменного тока требуется однофазный ток частотой 400 *гц* при напряжении 115 *в*. Для питания двигателей гироскопических приборов применяется трехфазный переменный ток частотой 400 и 500 *гц* и напряжением 36 и/40 *в*. Кроме того, для питания некоторых специальных устройств используется трехфазный переменный ток частотой 1000 *гц* при напряжении 40 *в*, однофазный переменный ток частотой 400 *гц* при напряжении 26 *в* и т. д.

В настоящее время электроснабжение летательных аппаратов, как правило, осуществляется на постоянном токе при напряжении 27 *в*, а для получения переменного тока применяются различные вращающиеся преобразователи. В специальных наземных установках широкое применение получили вращающиеся преобразователи трехфазного переменного тока промышленной частоты в постоянный ток или в однофазный переменный ток повышенной частоты.

Все эти преобразователи можно разделить на три группы:

1) одноякорные преобразователи;
2) каскадные преобразователи;
3) двигатель-генераторные преобразователи.

Самой многочисленной является последняя группа преобразователей. Объясняется это тем, что двигатель-генераторные преобразователи в отличие от одноякорных и каскадных преобразователей допускают регулировку напряжения и частоты и, следователь-

*Таблица 10*

| Тип преобразователя | ПО-45 | УС-500 | ПК-750ф | ПО-500 | ПО-750 | ПО-1500 | ПО-4500 | ПО-6000 | ПАГ-1ф | ПТ-200Ц | МА-100М | МА-250М | МА-500М | МА-1500КМ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Номинальная мощность, *ва* | 43,5 | 485 | 290/250 | 500 | 750 | 1500 | 4500 | 6000 | 40 | 200 | 100 | 250 | 500 | 1500 |
| Напряжение питания, *в* | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 | 27 |
| Потребляемый ток не более, *а* | 3,15 | 35,0 | 35,0 | 39,5 | 56,0 | 104 | 280 | 370 | 3/3,5 | 14,0 | 11,0 | 20,0 | 35,0 | 98,0 |
| Выходное напряжение, *в* | 18,3 | 115 | 115/26 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 36 | 36 | 115 | 115 | 115 | 115 |
| Отдаваемый ток, *а* | 2,37 | 4,2 | 2,5/9,8 | 4,35 | 6,51 | 13,0 | 39,1 | 51,1 | 0,32/0,65 | 3,2 | 0,87 | 2,17 | 4,35 | 13,0 |
| Скорость вращения, *об/мин* | 7500 | 8000 | 6000 | 12000 | 12000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 |
| Частота, *гц* | 125 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| Число фаз | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Коэффициент мощности | 1,0 | 1,0 | 0,9/0,4 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,65 | 0,6 | 0,9 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Режим работы | Продолжительный | | | | | | | | | | | | | |
| К. п. д. не ниже, % | 32,0 | 52,0 | 40,0 | 42,3 | 45,0 | 48,0 | 54,0 | 54,0 | 28,0 | 31,0 | 33,0 | 40,5 | 44,5 | 57,0 |
| Вес не более, *кг* | 4,1 | 6,8 | 10,0 | 11,5 | 14,0 | 23,5 | 47,0 | 58,5 | 3,5 | 8,5 | 7,2 | 10 | 12,5 | 25,0 |

Примечания: 1. Преобразователь типа ПК-750ф имеет две обмотки переменного тока, с которых снимается напряжение 115*в* и 26*в*.

2. Преобразователь типа ПАГ-1ф рассчитан для питания одного или двух гиродвигателей.

но, полнее удовлетворяют жестким требованиям, предъявляемым к преобразователям в отношении стабильности этих параметров.

Номинальные данные некоторых преобразователей постоянно-переменного тока приведены в таблице 10.

## § 116. ОДНОЯКОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### 1. Одноякорные преобразователи с одной обмоткой на якоре

Одноякорный преобразователь представляет собой электрическую машину постоянного тока, у которой на валу со стороны, противоположной коллектору, размещены два контактных кольца, соединенные с обмоткой якоря (рис. 182, *а*).

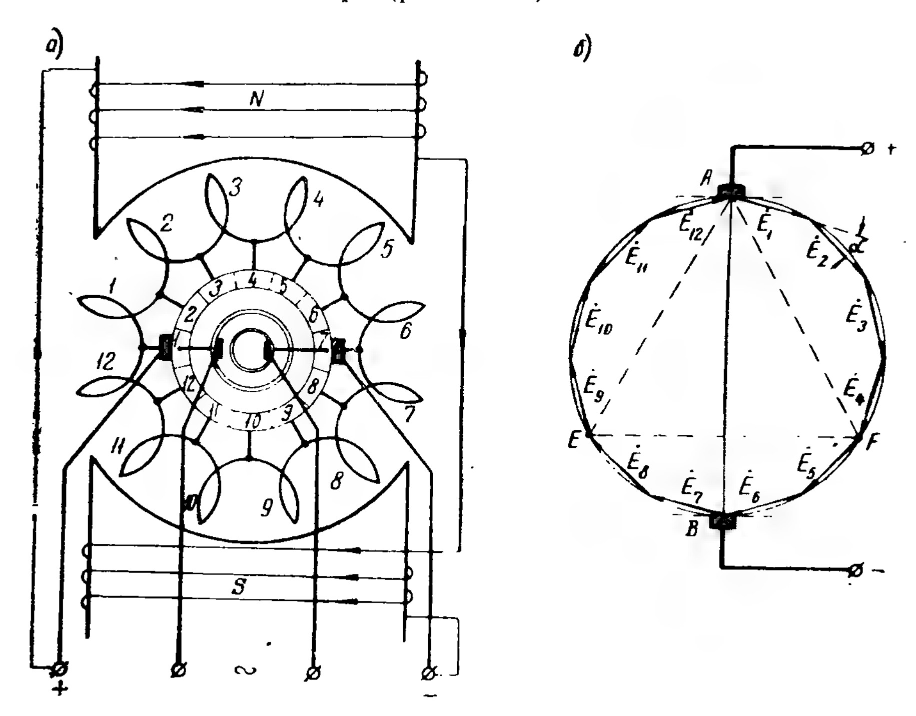



**Рис. 182. Принцип действия одноякорного преобразователя с одной обмоткой на якоре:**
**а) принципиальная электрическая схема; б) многоугольник э. д. с.**

При включении в сеть постоянного тока якорь преобразователя приходит во вращение и в его обмотке наводится переменная э. д. с., которая обусловливает на кольцах преобразователя переменное напряжение с частотой $f = \frac{pn}{60}$. Если, наоборот, к кольцам подвести переменный ток, то преобразователь будет работать в режиме синхронного двигателя, а с коллектора мож-

но будет снимать постоянное напряжение. Таким образом, в одноякорном преобразователе электрическая энергия сначала преобразуется в механическую, а затем механическая энергия преобразуется в электрическую.

Между напряжениями постоянного и переменного тока преобразователя существует вполне определенное соотношение, которое можно получить следующим образом. Предположим, что обмотка якоря состоит из 12 секций, расположенных равномерно по окружности якоря, т. е. каждая секция смещена относительно соседней на угол $\alpha = \frac{360}{12} = 30^\circ$. Если в воздушном зазоре электрической машины распределение магнитной индукции будет синусоидальным, то за один оборот якоря в каждой секции будет происходить полное изменение э. д. с. по синусоидальному закону. Синусоидально изменяющуюся э. д. с., как известно, можно изобразить вектором, равным по величине амплитуде этой э. д. с., который вращается против часовой стрелки с угловой скоростью $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{pn}{60}$. Проекция этого вектора на ось ординат в каждый момент времени будет определять мгновенное значение э. д. с.

В якорной обмотке все секции соединены последовательно, поэтому при обходе обмотки якоря необходимо производить геометрическое сложение э. д. с. секций. В результате сложения получается многоугольник э. д. с. (рис. 182,*б*), который при бесконечно большом количестве секций превращается в окружность. Если щетки размещены на геометрической нейтрали машины, то диаметр этой окружности $AB$ соответствует величине э. д. с. постоянного тока $E_{=}$. Поскольку в процессе построения многоугольника э. д. с. геометрически складываются амплитудные значения э. д. с. секций, диаметр $AB$ вместе с тем определяет амплитуду э. д. с. однофазного переменного тока, т. е.

$$E_{макс} = E_{=}.$$

Действующее значение э. д. с. в этом случае будет равно

$$E_{\sim} = \frac{E_{макс}}{\sqrt{2}} = \frac{E_{=}}{\sqrt{2}} \approx 0{,}71 E_{=}.$$

Полагая, что падение напряжения в цепи якоря равно нулю, имеем

$$U_{\sim} \approx 0{,}71 U_{=}.$$

Если на вал электрической машины постоянного тока насадить три кольца и соединить их с обмоткой якоря в трех точках, смещенных друг относительно друга на угол 120°, то получим одно-

якорный преобразователь трехфазного тока. Амплитуда э. д. с. в этом случае будет определяться стороной вписанного треугольника $AFE$, следовательно,

$$E_{3\,макс} = AF = AB\frac{\sqrt{3}}{2} = E_{=}\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Действующее значение э. д. с. трехфазного тока будет равно:

$$E_{3\sim} = \frac{E_{3\,макс}}{\sqrt{2}} = \frac{E_{=}}{2}\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \approx 0{,}613E_{=}.$$

Соотношение между постоянным и переменным током одноякорного преобразователя однофазного тока можно определить из уравнения мощности, положив его потери $\Delta P$ равными нулю, т. е.

$$P_{=} = P_{\sim} + \Delta P \approx P_{\sim}$$

или

$$U_{=}I_{=} = U_{\sim}I_{\sim}\cos\varphi,$$

откуда

$$I_{\sim} = \frac{U_{=}I_{=}}{U_{\sim}\cos\varphi} = \frac{U_{=}I_{=}}{\frac{U_{=}}{\sqrt{2}}\cos\varphi} = \sqrt{2}I_{=}\frac{1}{\cos\varphi}.$$

В случае, если $\cos\varphi = 1$,

$$I_{\sim} = 1{,}41I_{=}.$$

Так как одноякорный преобразователь, с одной стороны, представляет собой двигатель постоянного тока, а с другой — однофазный синхронный генератор, то ток в обмотке якоря можно рассматривать состоящим как бы из двух токов: постоянного тока $I_{=}$ и переменного тока $I_{\sim}$. Эти токи направлены навстречу друг другу, поэтому результирующий ток в обмотке якоря будет равен разности этих токов. Относительно малая величина результирующего тока в обмотке якоря является одной из характерных особенностей одноякорного преобразователя.

Поскольку результирующий ток в якоре невелик, размагничивающее действие поля реакции якоря будет ничтожно и падение напряжения в якоре будет мало. В результате этого выходное напряжение преобразователя в диапазоне номинальных нагрузок будет изменяться в очень небольших пределах. Небольшой результирующий ток в якоре и, следовательно, малые потери в меди якоря обусловливают у одноякорного преобразователя более высокий коэффициент полезного действия, чем, например, у электрических машин постоянного тока той же мощности. Вследствие того, что реакция якоря в значительной степени скомпенсирована, в одноякорном преобразователе обеспечиваются сравнительно благоприятные условия коммутации.

Однако указанными достоинствами одноякорный преобразователь обладает только в случае чисто активной нагрузки. При $\cos\varphi \neq 1$ за счет появления реактивной составляющей тока растут потери в меди якоря, снижается коэффициент полезного действия и ухудшаются условия коммутации преобразователя. Кроме того, в связи с появлением продольной составляющей реакции якоря изменяется магнитный поток возбуждения машины. Это не вызывает изменения величины выходного напряжения преобразователя, так как одновременно с потоком возбуждения изменяется и скорость вращения преобразователя, но сопровождается изменением частоты. В связи с этим одноякорные преобразователи обычно применяются для питания потребителей с $\cos\varphi = 1$. Например, бортовой одноякорный преобразователь типа ПО-45 (преобразователь однофазный с расчетной мощностью 45 *ва*) используется для питания усилителя и мостовой части схемы автопилота. Общий вид этого преобразователя представлен на рис. 183.

Преобразователь ПО-45 представляет собой двухполюсную электрическую машину смешанного возбуждения. Наличие последовательной обмотки возбуждения обеспечивает преобразователю хорошие пусковые свойства. В пазах якоря уложена петлевая обмотка, концы которой присоединены к коллекторным пластинам. Коллектор собран на металлической втулке. От двух противоположных коллекторных пластин сделаны отводы к контактным кольцам, насаженным на вал со стороны, противоположной коллектору. Контактные кольца опрессованы пластмассой. Полюса и якорь преобразователя набраны из листовой электротехнической стали. Корпус изготовлен из стальной трубы. Подшипниковые щиты выполнены из алюминия. Для снижения уровня радиопомех преобразователь снабжается коробкой фильтров.

Электромагнитные свойства одноякорного преобразователя определяются его рабочими и эксплуатационными характеристиками.

Рабочие характеристики преобразователя представляют собой зависимость

$$I_{=},\ n,\ U_{\sim},\ \eta = f(I_{\sim}) \text{ при } U_{=н} = \text{const и } \cos\varphi = 1.$$

Примерный вид этих характеристик изображен на рис. 184,*а*. Как видно из приведенного графика, ток, потребляемый преобразователем из сети $I_{=}$, растет примерно пропорционально нагрузке. Скорость вращения, а следовательно, и частота преобразователя при увеличении нагрузки от $I_{\sim} = 0$ до $I_{\sim} = I_{\sim н}$ изменяются в сравнительно небольших пределах, что объясняется малым падением напряжения в цепи якоря. Выходное напряжение преобразователя $U_{\sim}$ при увеличении тока $I_{\sim}$ несколько снижается за счет роста падения напряжения в цепи якоря и некоторого снижения скорости вращения. Характеристика $\eta = f(I_{\sim})$ имеет вид обычный для электрических машин.

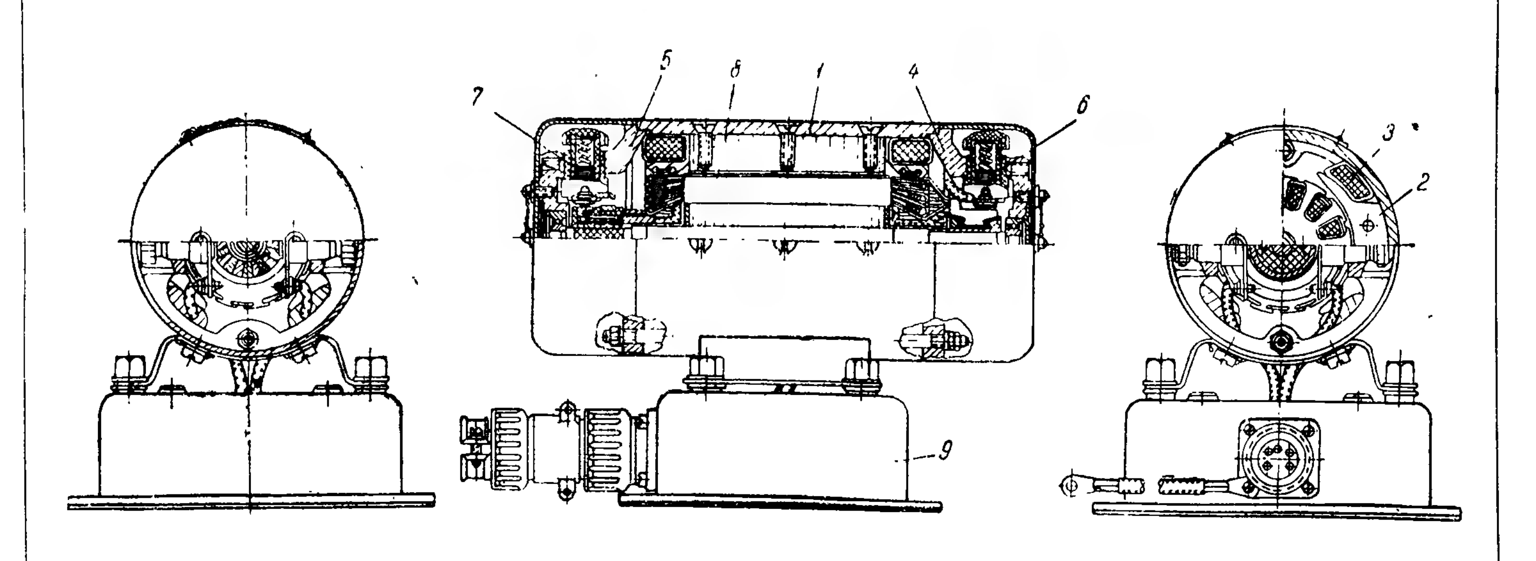



Рис. 183. Устройство одноякорного преобразователя:
1—корпус; 2—полюс; 3—катушка возбуждения; 4—щит со стороны коллектора; 5—щит со стороны колец; 6 и 7—щеткодержатели; 8—якорь; 9—коробка фильтров

Эксплуатационные характеристики одноякорного преобразователя показывают зависимость тех же величин от напряжения питания при постоянном сопротивлении нагрузки, т. е.

$$I_{=},\ n,\ U_{\sim},\ \eta = f(U_{=}) \text{ при } r_{н} = \text{const}.$$

При изменении питающего напряжения в пределах $\pm 10\%$ скорость вращения и выходное напряжение преобразователя изменяются примерно пропорционально $U_{=}$ в диапазоне не более $\pm 16\%$ от их номинальных значений (рис. 184, *б*). Ток, потребляемый преобразователем из сети, при этом также изменяется не более чем на $3\%$.

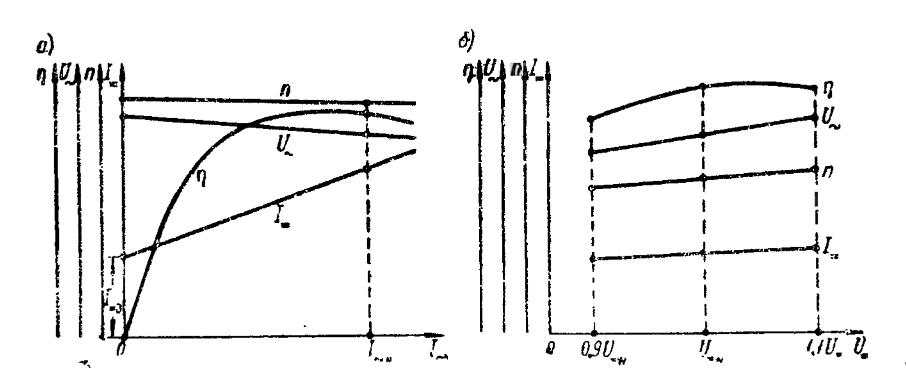



Рис. 184. Характеристики одноякорного преобразователя:
а) рабочие характеристики; *б*) эксплуатационные характеристики

Несмотря на указанные выше достоинства, одноякорные преобразователи с одной якорной обмоткой не получили широкого применения на летательных аппаратах из-за невозможности получить желаемого соотношения между питающим напряжением и напряжением переменного тока. Чтобы при данном напряжении бортовой сети получить любое по величине выходное напряжение, одноякорные преобразователи выполняются с двумя обмотками на якоре.

## 2. Одноякорные преобразователи с двумя обмотками на якоре

Одноякорный преобразователь с двумя якорными обмотками конструктивно похож на рассмотренный выше двухколлекторный преобразователь напряжения типа РУ, но его обмотка высшего напряжения присоединена не к коллектору, а к двум кольцам, с которых снимается переменное напряжение. Обмотка низкого напряжения присоединена к коллектору. Преобразователь имеет единую магнитную систему, на полюсах которой размещены катушки возбуждения.

При включении в сеть якорь преобразователя приходит во вращение и в его обмотках наводятся э. д. с.:

в обмотке якоря низкого напряжения

$$E_{=}=\frac{p}{60}\frac{N}{a}n\Phi;$$

в обмотке якоря высокого напряжения

$$E_{\sim}=4{,}44k_{об}wf\Phi.$$

Следовательно,

$$\frac{E_{\sim}}{E_{=}}=\frac{4{,}44k_{об}wf\Phi}{\frac{p}{60}\frac{N}{a}n\Phi}=\frac{4{,}44k_{об}w}{\frac{N}{a}}=\text{const},$$

т. е. соотношение между э. д. с. переменного и постоянного тока зависит только от обмоточных данных одноякорного преобразователя.

Рабочие свойства у одноякорных преобразователей с одной и двумя якорными обмотками совершенно аналогичны. Двухобмоточные одноякорные преобразователи, так же как и однообмоточные, не допускают регулирования выходного напряжения путем изменения тока возбуждения. Размагничивающее действие поля реакции якоря у них ничтожно мало, в связи с этим довольно благоприятны условия для безыскровой коммутации.

На летательных аппаратах применение получили двухобмоточные одноякорные преобразователи типа УС-500 (преобразователь с расчетной мощностью 500 *ва*), которые используются для питания следящих систем управления стрелково-пушечного вооружения. УС-500 представляет собой шестиполюсную электрическую машину со смешанным возбуждением. Чтобы обеспечить при работе преобразователя в необходимых пределах стабильную частоту, параллельная и последовательная обмотки возбуждения включены встречно.

## § 117. КАСКАДНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Каскадный преобразователь представляет собой комбинацию двух электрических машин: одноякорного преобразователя и асинхронной машины, которые размещены в одном корпусе и имеют общий вал. Принципиальная электрическая схема каскадного преобразователя изображена на рис. 185.

При включении преобразователя в сеть якорь его приходит во вращение со скоростью $n_1$, в связи с чем в обмотке якоря наводится переменная э. д. с. с частотой

$$f_1 = \frac{p_1 n_1}{60},$$

где $p_1$ — число пар полюсов одноякорного преобразователя.

Обмотка якоря одноякорного преобразователя соединена с обмоткой ротора асинхронной машины. Это соединение выполнено так, чтобы магнитный поток $\Phi_2$, создаваемый током ротора, получаемым из обмотки якоря одноякорного преобразователя, вра-

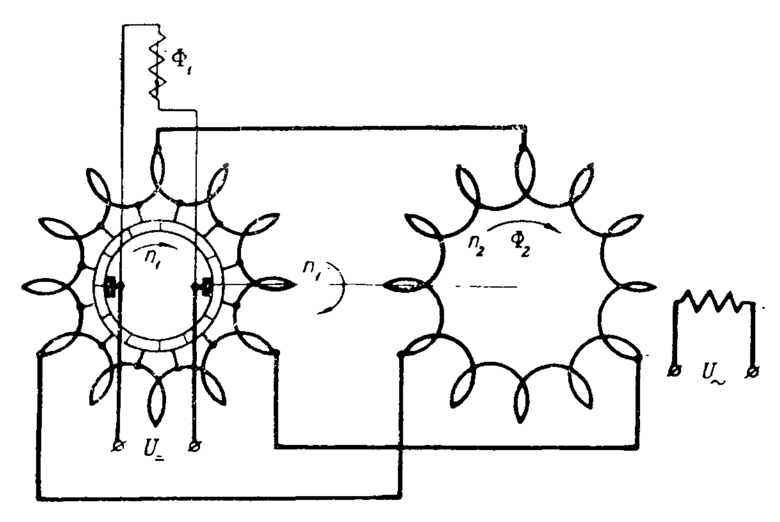



Рис. 185. Принципиальная электрическая схема каскадного преобразователя

щался в ту же сторону, что и ротор. Следовательно, при частоте тока в роторе $f_1$ скорость вращения магнитного потока относительно ротора будет равна:

$$n_2 = \frac{60 f_1}{p_2},$$

где $p_2$ — число пар полюсов асинхронной машины.

Так как скорость вращения ротора $n_1$, а скорость вращения магнитного потока относительно ротора $n_2$, то скорость вращения этого потока относительно статора асинхронной машины будет:

$$n = n_1 + n_2.$$

За счет этого потока в обмотке статора, которая является обмоткой якоря каскадного преобразователя, будет наводиться э. д. с. переменного тока частотой

$$f_2 = \frac{p_2 n}{60} = p_2 \frac{(n_1 + n_2)}{60}.$$

Таким образом, в каскадном преобразователе имеются две ступени преобразования. В первой ступени постоянный ток, получаемый из бортовой сети, преобразуется в переменный ток частоты $f_1$. Во второй ступени переменный ток частоты $f_1$ преобразуется в переменный ток более высокой частоты $f_2$.

Для питания специальных устройств на летательных аппаратах иногда применяется каскадный преобразователь типа ПК-750ф (преобразователь каскадный с расчетной мощностью 750 *ва*). Этот преобразователь состоит из четырехполюсного одноякорного преобразователя со смешанным возбуждением и асинхронной машины, ротор которой имеет многофазную обмотку, создающую четырехполюсное магнитное поле. На статоре асинхронной машины размещены две обмотки, с которых снимается напряжение переменного тока 115 и 26 *в*. Поскольку обе машины имеют по две пары полюсов ($p_1 = p_2 = 2$), для получения на выходе частоты $f_2 = 400$ *гц* каскадный преобразователь выполнен с номинальной скоростью вращения $n = 6000$ *об/мин*.

Рабочие свойства каскадного преобразователя оцениваются по его рабочим и эксплуатационным характеристикам, которые в основном аналогичны характеристикам одноякорного преобразователя. Исключение составляет скоростная характеристика, которая у каскадного преобразователя типа ПК-750ф будет более жесткой в связи с применением у него специального центробежного регулятора скорости вращения вибрационного типа.

В каскадном преобразователе, так же как в рассмотренных выше одноякорных преобразователях, система возбуждения является общей для постоянного и переменного тока. Если изменять ток возбуждения, то будет изменяться скорость вращения и, следовательно, частота преобразователя, но не выходное напряжение. Это существенный недостаток, благодаря которому каскадные преобразователи не получили широкого применения.

## § 118. ДВИГАТЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

### 1. Преобразователи типа ПО

Преобразователь типа ПО (преобразователь однофазный) служит для преобразования постоянного тока напряжением 27 *в* в однофазный переменный ток напряжением 115 *в* и частотой 400 *гц*. Преобразователь предназначен для централизованного питания переменным током электрических потребителей летательных аппаратов.

Преобразователь представляет собой агрегат, состоящий из двух электрических машин: двигателя постоянного тока и однофазного синхронного генератора, заключенных в общий корпус. На корпусе устанавливается коробка, в которой размещается аппаратура управления преобразователем. Конструкция преобразователя типа ПО представлена на рис. 186.

Приводной двигатель преобразователя имеет смешанное возбуждение и дополнительные полюсы. Наличие последовательной обмотки возбуждения обеспечивает преобразователю хорошие пусковые свойства. Обмотка якоря петлевая с уравнительными соединениями. Коллектор выполнен на металлической втулке.

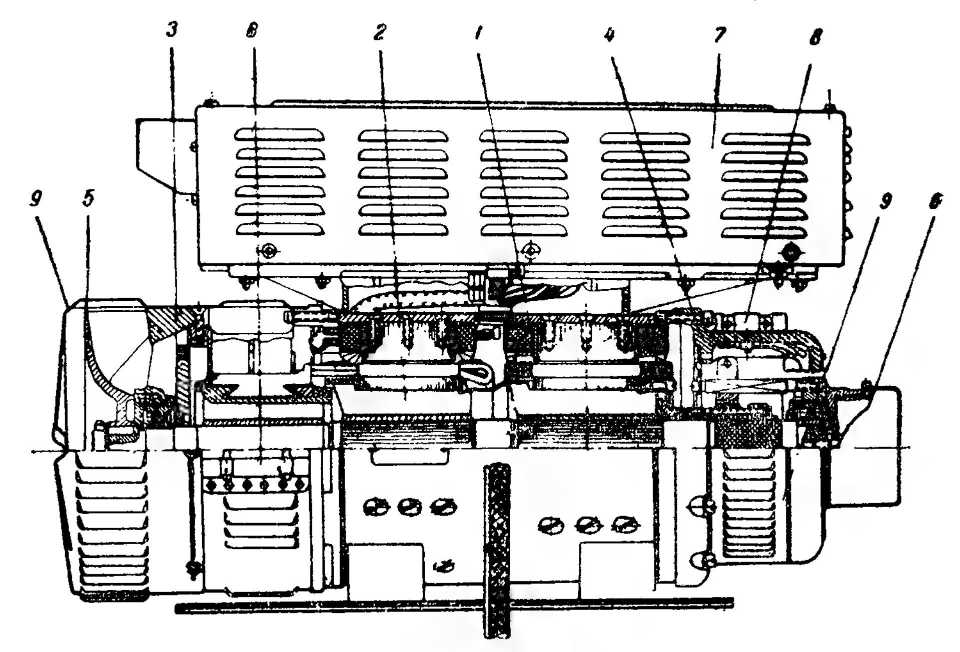



Рис. 186. Устройство двигатель-генераторного преобразователя типа ПО:
*1*—корпус; *2*—якорь; *3* и *4*—коллекторные щиты; *5*—вентилятор; *6*—центробежный переключатель; *7*—коробка управления; *8*—защитная лента; *9*—колпак

Синхронный генератор имеет явнополюсное исполнение. Полюсы генератора размещены на статоре. В полюсах выполнены пазы, в которых уложена демпферная, или успокоительная обмотка. Демпферная обмотка изготовляется из медных стержней, которые с торцов замыкаются накоротко шинами или кольцами.

Обмотка якоря однофазная катушечная. Размещена она на роторе. Концы ее присоединены к кольцам, на которых установлены щетки для отвода тока во внешнюю цепь. Пазы якоря не все заполнены обмоткой. Это сделано с целью улучшения формы кривой э. д. с. и для снижения расхода меди.

Преобразователь имеет защищенное исполнение. Для создания интенсивной циркуляции воздуха он снабжен вентилятором. На валу преобразователя установлен центробежный переключатель, который при увеличении скорости вращения выше определенного предела отключает работающий преобразователь и автоматически вместо него включает в работу резервный, если он имеется.

Для снижения помех радиоприему, возникающих при работе, в схему преобразователя включен фильтр.

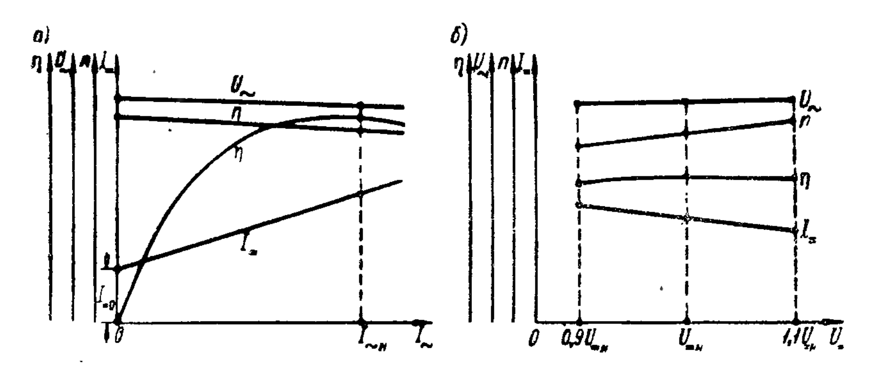


Рис. 187. Характеристики двигатель-генераторного преобразователя типа ПО:
а) рабочие характеристики; б) эксплуатационные характеристики

В преобразователе осуществлена стабилизация выходного напряжения и частоты. Благодаря этому при колебаниях напряжения питания в диапазоне $\pm 10\%$ и при изменении тока нагрузки от $I_{\sim}=0$ до $I_{\sim}=I_{\sim н}$ напряжение на выходных зажимах преобразователя изменяется примерно на 3—4%, а частота не более чем на 5—7%. Примерный вид рабочих и эксплуатационных характеристик преобразователей типа ПО приведен на рис. 187.

## 2. Преобразователи типа МА

Преобразователь типа МА (мотор-альтернатор) служит для преобразования постоянного тока напряжением 27 *в* в однофазный переменный ток напряжением 115 *в* и частотой 400 *гц*. Преобразователь предназначен для питания специальных установок летательных аппаратов.

Преобразователь состоит из двигателя постоянного тока и однофазного синхронного генератора индукторного типа, объединенных в общем корпусе и имеющих общий вал. В коробке управления, укрепленной на корпусе преобразователя, размещена пускорегулирующая аппаратура. Конструкция преобразователя типа МА представлена на рис. 188.

Приводной двигатель преобразователя — четырехполюсный, обычно с двумя обмотками возбуждения. Последовательная обмот-

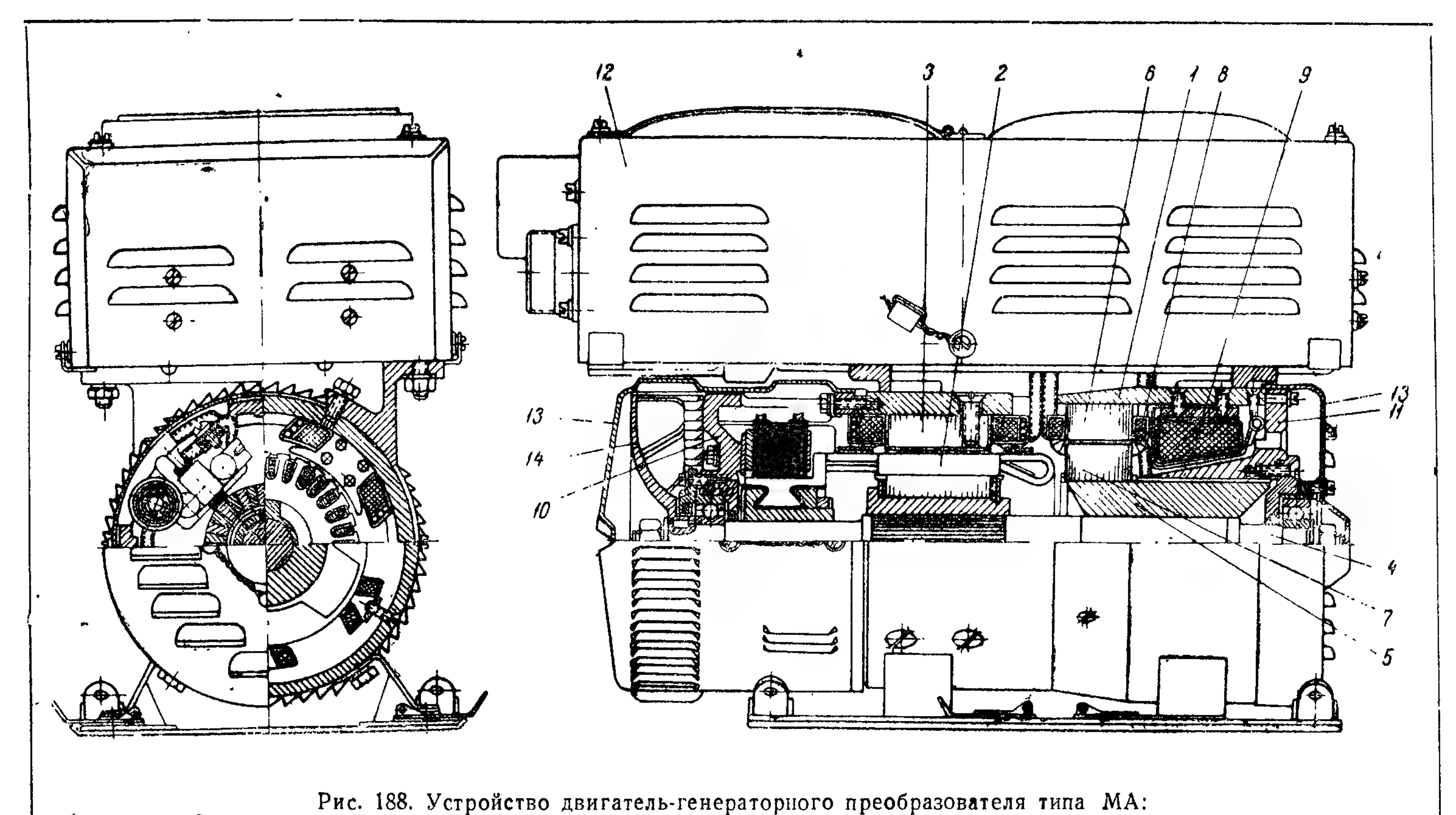



Рис. 188. Устройство двигатель-генераторного преобразователя типа МА:
*1*—корпус; *2*—якорь двигателя; *3*—полюс двигателя; *4*—вал; *5*—стальной сердечник генератора; *6*—зубцовый пакет статора генератора; *7*—зубцовый пакет ротора генератора; *8*—катушка обмотки якоря генератора; *9*—обмотка возбуждения генератора; *10*—коллекторный щит; *11*—подшипниковый щит; *12*—коробка управления; *13*—колпак; *14*—вентилятор

ка возбуждения, которой снабжаются все преобразователи типа МА мощностью более 100 *ва*, является дополнительной обмоткой, так как она используется только при пуске преобразователя. После того как преобразователь придет во вращение, последовательная обмотка автоматически закорачивается и приводной двигатель работает только с параллельным возбуждением. Это обеспечивает преобразователю жесткую скоростную характеристику. Для снижения радиопомех преобразователь снабжен фильтром. Чтобы обеспечить на выходных зажимах преобразователя стабиль-

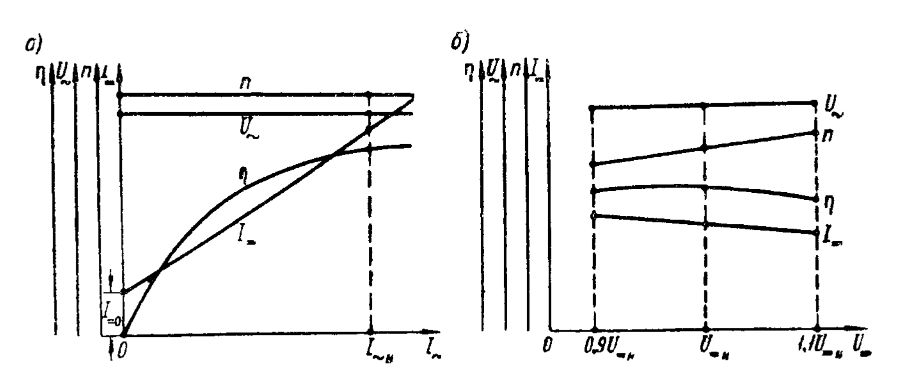


Рис. 189. Характеристики преобразователя типа МА:
а) рабочие характеристики; б) эксплуатационные характеристики

ное напряжение, в схему преобразователя включается угольный регулятор. Благодаря этому изменение выходного напряжения при изменении нагрузки, а также при колебаниях питающего напряжения в пределах от 20 до 30 *в* не превышает 5%.

Преобразователь имеет защищенное исполнение и для охлаждения снабжается вентилятором, который устанавливается на валу со стороны приводного двигателя.

Механические и электрические свойства преобразователя типа МА оцениваются его рабочими и эксплуатационными характеристиками, которые приведены на рис. 189.

### 3. Преобразователи для питания гироскопических приборов

Основным элементом современного гироскопического прибора является электрический гироскоп, который представляет собой либо миниатюрный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, либо синхронный двигатель гистерезисного типа. Для питания этих двигателей требуется трехфазный переменный ток частотой 400 и 500 *гц* и напряжением соответственно 36 и 40 *в*. В связи с этим на самолетах и ракетах, кроме преобразователей типа ПО, МА и др., применяются еще специальные преобразователи типа ПТ, ПАГ-1ф, УФ и др.

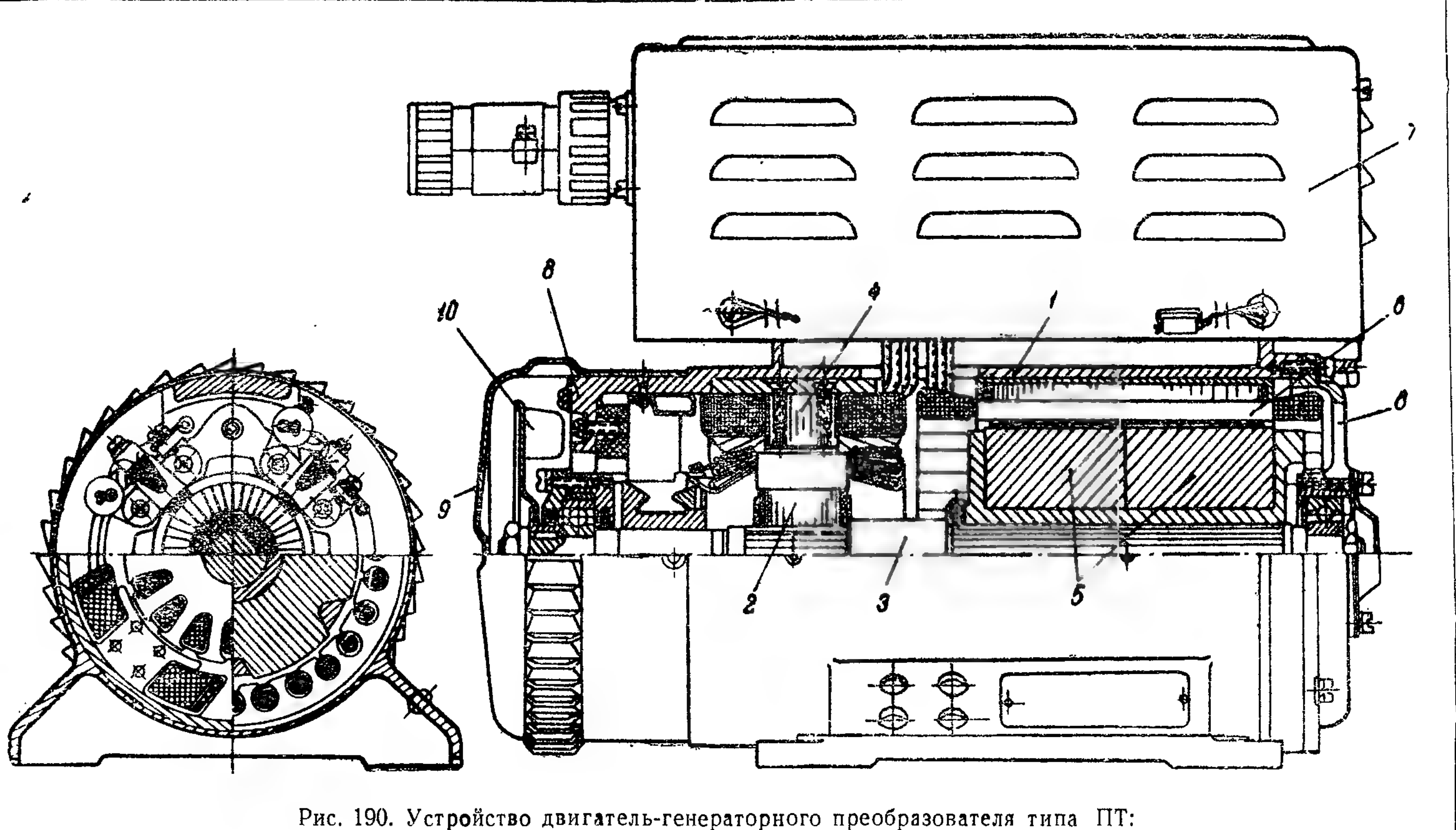



Рис. 190. Устройство двигатель-генераторного преобразователя типа ПТ:
*1*—корпус; *2*—якорь двигателя; *3*—вал; *4*—полюс двигателя с катушкой возбуждения; *5*—постоянные магниты; *6*—обмотка якоря генератора; *7*—коробка управления; *8*—подшипниковый щит; *9*—колпак; *10*—вентилятор

Например, преобразователь типа ПТ-200Ц (преобразователь трехфазный мощностью 200 *ва*) предназначается для автономного или централизованного питания нескольких электрических гироскопических приборов и автоматов. Преобразователь типа ПАГ-1ф (преобразователь авиагоризонта) может быть использован для питания только одного или двух гироприборов.

Конструктивно оба преобразователя выполнены одинаково. Они представляют собой двигатель-генераторный агрегат, состоящий из двух электрических машин, смонтированных в одном корпусе, а именно: двигателя постоянного тока и трехфазного синхронного генератора. Двигатели обоих преобразователей имеют смешанное возбуждение, что обеспечивает им хорошие пусковые свойства.

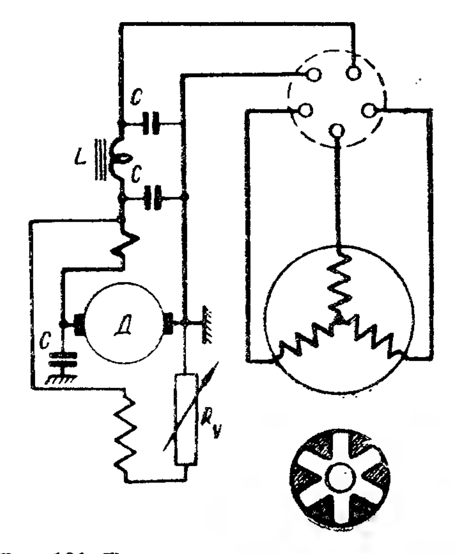


Рис. 191. Принципиальная электрическая схема преобразователя типа ПАГ-1Ф

Генераторы трехфазные, их роторы представляют собой шестиполюсные звездообразные постоянные магниты, которые отливаются из специальных магнитотвердых сплавов, обладающих большой коэрцитивной силой. Для облегчения обработки и насадки на вал роторы заливаются алюминием. Статоры синхронных генераторов представляют собой пакеты, набранные из листовой легированной электротехнической стали. По внутреннему диаметру пакетов расположены пазы, в которых размещаются трехфазные якорные обмотки. Фазы обмоток соединяются звездой. Нулевая точка не выводится. Для снижения радиопомех преобразователи снабжаются специальными фильтрами. На рис. 190 в качестве примера приведена конструкция преобразователя типа ПТ-200Ц.

Синхронные магнитоэлектрические генераторы обладают рядом преимуществ перед генераторами электромагнитного возбуждения. К таким преимуществам относятся высокая надежность в работе, простота конструкции, отсутствие скользящих контактов, относительно высокий коэффициент полезного действия в связи с отсутствием потерь на возбуждение. К недостаткам генераторов с постоянными магнитами следует отнести отсутствие простых и экономичных способов регулирования выходного напряжения, а также несколько более сложную эксплуатацию магнито-электрической машины, поскольку при ее разборке всегда имеется опасность размагничивания ротора.

В бортовых преобразователях типа ПТ-200Ц и ПАГ-1ф нет стабилизации выходного напряжения, но приняты меры для поддержания постоянной частоты. В схему преобразователя ПТ-200Ц с этой целью включен автоматический регулятор частоты с магнитным усилителем, а в цепь параллельной обмотки возбуждения преобразователя ПАГ-1ф включено специально регулировочное со-

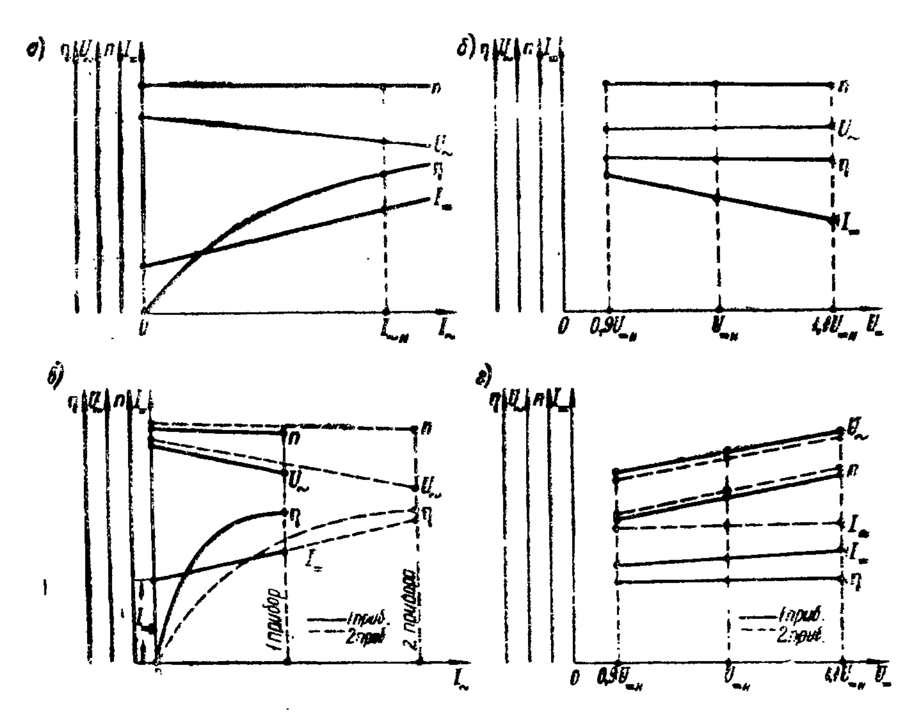


Рис. 192. Характеристики преобразователей ПТ-200Ц и ПАГ-1ф:
а) рабочие характеристики преобразователя ПТ-200Ц; б) эксплуатационные характеристики преобразователя ПТ—200Ц; в) рабочие характеристики преобразователя ПАГ-1ф; г) эксплуатационные характеристики преобразователя ПАГ-1ф

противление $R_у$ (рис. 191), которое позволяет устанавливать скорость вращения, а следовательно, и частоту переменного тока в зависимости от величины нагрузки преобразователя. Поскольку преобразователь ПАГ-1ф может питать только один или два гироскопа, движок установочного сопротивления имеет два фиксированных положения.

На рис. 192 изображены рабочие и эксплуатационные характеристики преобразователей. Как видно из приведенных графиков, скорость вращения, а следовательно, и частота практически не зависят от нагрузки и величины питающего напряжения. В связи с этим и выходное напряжение преобразователей изменяется в весьма небольших пределах.

## 4. Преобразователи типа АЛА

Преобразователи типа АЛА служат для преобразования трехфазного переменного тока промышленной частоты 50 *гц* и напряжения 127, 220 или 380 *в* в однофазный переменный ток повышенной частоты 427 *гц* и напряжения 115 или 230 *в*.

Преобразователи используются в качестве наземных источников электрической энергии для питания специальных устройств.

Преобразователь типа АЛА состоит из трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и однофазного синхронного генератора с самовозбуждением. Обе машины размещены в общем стальном цилиндрическом корпусе и имеют общий вал. Вал вращается в двух шариковых подшипниках, размещенных в литых алюминиевых подшипниковых щитах. Генератор у АЛА, так же как у преобразователя типа МА, индукторного типа, но двухпакетного исполнения, т. е. на статоре и роторе симметрично относительно обмотки возбуждения генератора размещены два зубцовых пакета.

Преобразователь имеет брызгозащищенное исполнение и аксиальную вытяжную вентиляцию, осуществляемую за счет центробежного вентилятора. На корпусе преобразователя установлены две коробки. В одной из них размещены зажимы двигателя, в другой — генератора.

Преобразователь снабжен аппаратурой для дистанционного управления агрегатом, имеет автоматический регулятор для поддержания постоянного напряжения на зажимах генератора, а также допускает ручное регулирование напряжения посредством реостата в цепи возбуждения генератора. В схеме управления преобразователем предусмотрена защита двигателя от перегрузок и генератора от перегрузок и коротких замыканий.

## 5. Преобразователь типа МГ

Преобразователь представляет собой двигатель — генераторный агрегат, служащий для преобразования трехфазного переменного тока частотой 50 *гц* и напряжения 220 или 380 *в* в постоянный ток напряжением 26—36 *в*.

Преобразователь используется в качестве наземного источника электрической энергии для питания специальных устройств.

Преобразователь состоит из трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и четырехполюсного генератора постоянного тока смешанного возбуждения, которые размещены в общем корпусе и имеют общий вал. Охлаждение преобразователя осуществляется с помощью центробежного вентилятора, установленного на валу. На корпусе преобразователя смонтирована коробка, в которой размещены зажимы двигателя и генератора. В зависимости от напряжения питающей сети статорная обмотка асинхронного двигателя соединяется звездой или треугольником.

Для дистанционного управления агрегатом, контроля за его работой, обеспечения стабильного напряжения на зажимах генератора и защиты преобразователь снабжен комплектом специальной аппаратуры.

---

## ЛИТЕРАТУРА

1. Акимов В. Н., Апаров Б. П., Балагуров В. А., Галтеев Ф. Ф., Коробан Н. Т., Ларионов А. Н., Мастяев Н. З., Основы электрооборудования самолетов и автомашин, ГЭИ. 1955.

2. Александров Н. Н., Самолетные преобразователи электрической энергии, ЛКВВИА им. А. Ф. Можайского, 1958.

3. Белоновский А. С., Менский Б. М., Автоматизированный привод с электромашинным усилителем, Воениздат, 1956.

4. Бергер Л. Я., Синхронные машины, ГОНТИ, 1938.

5. Бобов К. С., Винокуров В. А., Авиационные электрические машины, часть II, ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, 1958.

6. Бобов К. С., Маркин И. С., Винокуров В. А., Шустер И. И., Красношапка М. М., Захаров А. В., Авиационные электрические машины переменного тока, применяемые в системах автоматического управления, Труды ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, вып. 585, 1955.

7. Бокстон О., Проблема охлаждения самолетных электрических машин, Electrical Enginiering, Jan., 1956.

8. Буданцев И. И., Грузов Л. Н., Специальные электрические машины установок связи и радиолокации, ВКАС, 1948.

9. Буданцев И. И., Сиваков А. Р., Специальные электрические машины установок связи, ВКАС, 1954.

10. Винокуров В. А., Синхронные машины, ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, 1953.

11. Винокуров В. А., Красношапка М. М., Расчет электромашинных усилителей и одноякорных преобразователей постоянного тока, ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, 1952.

12. Горжевский И. И., Гистерезисный электродвигатель, «Вестник электропромышленности», 1956, № 1.

13. Данилов Г. И., Заславский Д. И., Коссович Р. А., Меерсон И. Г., Расчет и конструкция самолетных генераторов постоянного тока, ЛКВВИА им. А. Ф. Можайского, 1952.

14. Ермолин Н. П., Ваганов А. П., Расчет маломощных трансформаторов, ГЭИ, 1957.

15. Коссович Р. А., Диссертация, ЛКВВИА им. А. Ф. Можайского, 1954.

16. Костенко М. П., Пиотровский Л. М., Электрические машины, часть I, ГЭИ, 1957.

17. Костенко М. П., Пиотровский Л. М., Электрические машины, часть II, ГЭИ, 1958.

18. Кравчук М. В., Особенности конструкций авиационных электрических машин постоянного тока и преобразователей, ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, 1954.

19. Красношапка М. М., Индукторные генераторы, ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, 1948.

20. Красношапка М. М., Лекции по электромеханике, ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, вып. 1 и 2, 1949.

21. Кулебакин В. С., Основные статические характеристики амплидин-генераторов, Известия АН СССР, ОТН № 6, 1945.
22. Кулебакин В. С., Морозовский В. Т., Синдеев И. М., Электроснабжение самолетов, Оборонгиз, 1956.
23. Кулебакин В. С., Нагорский В. Д., Электропривод самолетных агрегатов и механизмов, Оборонгиз, 1958.
24. Ларионов А. Н., Мастяев Н. З., Романова Г. И., Гистерезисные двигатели, Труды МЭИ, вып. 16, 1956.
25. Меерсон И. Г., Расчет трансформаторов авиационного типа с тороидальными сердечниками, ЛКВВИА им. А. Ф. Можайского, 1956.
26. Петухов Б. Н., Электроснабжение самолетов, ЛКВВИА им. А. Ф. Можайского, 1954.
27. Пиотровский Л. М., Электрические машины, ГЭИ, 1956.
28. Поляков Н. А., Электрические машины, Машгиз, 1953.
29. Попков С. Л., Основы следящего электропривода, Оборонгиз, 1958.
30. Попов Д. А., Охлаждение самолетных электрических машин и аппаратов в высотных условиях, «Иностранная хроника», 1948, № 3.
31. Розенблат М. А., Магнитные усилители, ГЭИ, 1955.
32. Романов М. А., Попов Д. А., Электропривод и преобразователи электрической энергии на самолете, Воениздат, 1953.
33. Сазанов П. И., Условия применения и работоспособность электрических машин с воздушным охлаждением на сверхзвуковых самолетах, ЛКВВИА им. А. Ф. Можайского, 1957.
34. Свириденко П. А., Красношапка М. М., Винокуров В. А., Расчет электрических машин переменного тока повышенной частоты, ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, 1951.
35. Толвинский В. А., Электрические машины постоянного тока, ГЭИ, 1956.
36. Чечет Ю. С., Управляемый асинхронный двигатель с полым ротором, ГЭИ, 1955.
37. Чечет Ю. С., Электрические микромашины автоматических устройств, ГЭИ, 1957.
38. Шенфер К. И., Асинхронные машины, ГЭИ, 1931.
39. Шустер И. И., Трансформаторы, ВВИА имени проф. Н. Е. Жуковского, 1953.
40. Юферов Ф. М., Электрические двигатели автоматических устройств, ГЭИ, 1959.

---

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр

## Раздел первый

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### *Глава I.* Принцип действия и устройство машин постоянного тока



### *Глава II.* Обмотки якоря и магнитная цепь машин постоянного тока



### *Глава III.* Реакция якоря и коммутация

